



Universidad
Carlos III de Madrid

Grado en Ingeniería Electrónica Industrial y
Automática

TRABAJO FIN DE GRADO

Vibrómetro de fibra óptica codificado en frecuencia

Autor: Guillermo Sánchez Prudencio

Tutor: José Antonio García Souto

Leganés, Junio de 2013

Título: VIBRÓMETRO DE FIBRA ÓPTICA CODIFICADO EN
FRECUENCIA

Autor:

Director:

EL TRIBUNAL

Presidente: _____

Vocal:

Secretario:

Realizado el acto de defensa y lectura del Proyecto Fin de Carrera el día __ de
_____ de 20__ en Leganés, en la Escuela Politécnica Superior de la Universidad
Carlos III de Madrid, acuerda otorgarle la CALIFICACIÓN de

VOCAL

SECRETARIO

PRESIDENTE

Agradecimientos

A mis padres, mi hermana y al resto de mi familia, por el apoyo que me han dado siempre y por el interés que me han prestado durante el desarrollo de este proyecto.

A mis amigos y compañeros, que han hecho de estos años una experiencia mucho más amena y accesible de la que habría resultado sin ellos.

A mi tutor José Antonio, por permitirme elaborar un trabajo mediante el cual he podido desarrollar competencias en ámbitos que van más allá de la ingeniería, y a Julio Posada, por la ayuda prestada para la realización del proyecto.

Resumen

En el presente proyecto se expone el desarrollo de un vibrómetro basado en fibra óptica. La motivación de este proyecto es el diseño de un sistema capaz de monitorizar las vibraciones de una máquina mediante el uso de tecnología láser y de fibra óptica.

Mediante este sistema es posible el cálculo de la frecuencia y amplitud de la vibración de la máquina. El vibrómetro está basado en el principio de interferencia de la luz. Un haz de luz coherente proporcionado por un láser se divide en dos: uno recorre una fibra óptica anclada a la máquina en uno de sus extremos y se compara con el otro que recorre otra fibra óptica de longitud fija tomada como referencia. La combinación de ambos provoca un patrón de interferencia que contiene información de la vibración.

Para la medida se utiliza un interferómetro de fibra óptica. Bajo las condiciones seleccionadas para la amplitud y componentes de frecuencia de las vibraciones, la medida está contenida en la frecuencia de la señal de salida. Realizando una demodulación del patrón de interferencia obtenido a la salida del interferómetro es posible calcular los parámetros característicos de la vibración. Para realizar esa demodulación se ha diseñado un algoritmo implementado en un instrumento virtual mediante LabVIEW.

El registro de las señales se ha llevado a cabo mediante el módulo de adquisición de alta velocidad CS328A, de CleverScope. Para integrar la adquisición de las señales con el análisis mediante los instrumentos virtuales se han programado los drivers proporcionados por los fabricantes.

Para realizar las medidas de calibración, se ha construido un dispositivo capaz de forzar una vibración controlada e integrar el sensor de fibra óptica. Este dispositivo está basado en un altavoz controlado mediante un generador de funciones. Junto con la fibra

Resumen

óptica, al altavoz se le ha acoplado un acelerómetro, que proporciona la referencia de medida de la vibración durante los ensayos de calibración del sistema completo.

Palabras Clave: Vibrómetro, Fibra Óptica, Interferometría Láser, Adquisición de Alta Velocidad, CleverScope CS328A, LabVIEW, Demodulación FM.

Abstract

In this project is exposed the development of a fiber optic based vibrometer. The motivation of this project is the design of a system able to monitor the vibration of a machine by the usage of laser and fiber optic technology.

Through this system we are able to calculate the frequency and amplitude of the vibration of a machine. The vibrometer is based on the light interference principle. A beam of coherent light provided by a laser is divided in two beams: one of them travels across a fiber optic fixed to the machine and is compared with the other beam which travels through a constant length fiber that is used as a reference. The combination of both beams result in an interference pattern which contains the information of the vibration.

A fiber optic interferometer is used to do the measurements. Under the selected conditions for amplitude and frequency components, the measurement is included in the frequency of the output signal. Performing a demodulation of the interference pattern obtained at the output of the interferometer we are able to estimate the characteristic parameters of the vibration. To do that demodulation an algorithm implemented on a virtual instrument programmed on LabVIEW has been designed.

The signal had been acquired by the high speed module CS328A by CleverScope. To integrate the signal acquisition and the analysis by the virtual instruments the drivers provided by the manufactures had been programmed.

To do the calibration tests a device capable to force a controlled vibration and integrate the fiber optic sensor has been built. This device is based on a speaker controlled by a function generator. In addition, an accelerometer has been fixed to the speaker to provide the measures' reference of the vibration during the calibration test of the whole system.

Key Words: Vibrometer, Fiber Optic, Interferometry Laser, High Speed Acquisition, CleverScope CS328A, LabVIEW, FM Demodulation.

Índice general

Agradecimientos.....	iii
Resumen.....	v
Abstract	vii
Índice general	ix
Índice de figuras	xiii
ESQUEMAS	xiii
ILUSTRACIONES	xiii
CAPTURAS DE PANTALLA.....	xiv
GRÁFICAS	xvi
Índice de tablas	xvii
Capítulo 1. Introducción, motivación y objetivos	1
1.1. Introducción y motivación.....	1
1.2. Objetivos y fases de desarrollo	3

Índice general

1.3. Medios empleados.....	4
1.4. Estructura de la memoria.....	6
Capítulo 2. Principio de funcionamiento.	7
2.1. Interferencia de la luz.....	8
2.2. Medida de la vibración.....	12
Capítulo 3. Adquisición de datos mediante hardware y software	17
3.1. Interferómetro	18
3.2. Software Cleverscope.....	22
3.3. Driver LabVIEW	23
Capítulo 4. Demodulación del interferograma mediante LabVIEW.....	31
4.1. Esquema básico del VI de demodulación y almacenamiento de datos	33
4.2. Algoritmo de demodulación del interferograma.....	35
4.4.1 Cálculo de la frecuencia de vibración	35
4.4.2. Cálculo de la elongación de la fibra óptica.....	38
4.3. Adquisición de parámetros del acelerómetro.	40
4.4. Almacenamiento de datos, presentación por pantalla y flujo de errores..	44
Capitulo 5. Medidas y calibración del instrumento.....	51
5.1. Experimento de calibración	52
5.2. Calibración a 100 Hz.....	55
5.3. Calibración a 200 Hz.....	60
5.4. Calibración a 300 Hz.....	63
5.5. Calibración a 500 Hz.....	65
5.6. Calibración a frecuencia variable.....	67
5.7. Discusión de los resultados	69

Capítulo 6. Conclusiones	71
Referencias.....	73
Bibliografía.....	74
Ilustraciones.....	74
Anexos	77
Hojas de característica	77
Manuales	79
Códigos Matlab	79
Datos calibración	81
Calibración a 100 Hz.....	81
Calibración a 200 Hz.....	82
Calibración a 300 Hz.....	83
Calibración a 500 Hz.....	85
Calibración a frecuencia variable	86

Índice de figuras

ESQUEMAS

Esquema 1. Esquema general del proyecto.....	2
Esquema 2. Diagrama de bloques completo.	5
Esquema 3. Esquema óptico del interferómetro.....	12
Esquema 4. Diagrama funcional VI.	33

ILUSTRACIONES

Ilustración 1. Onda electromagnética.	8
Ilustración 2. Onda sinusoidal.	8
Ilustración 3. Espectro electromagnético.	9
Ilustración 4. Diferentes tipos de luz.	10
Ilustración 5. Interferencia de las ondas.	10
Ilustración 6. Cleverscope CS328A.....	17
Ilustración 7. Esquema completo del interferómetro.....	19
Ilustración 8. Interferómetro.	19

Índice de figuras

Ilustración 9. Fuente de alimentación del interferómetro.	21
Ilustración 10. Set up completo de laboratorio.	21
Ilustración 11. Logo LabVIEW.	24
Ilustración 12. Interferograma.	32
Ilustración 13. Interferograma 2.	36
Ilustración 14. Acondicionador del acelerómetro.	41
Ilustración 15. Diagrama de bloques. Flujo errores.	49
Ilustración 10. Set up completo de laboratorio.	52
Ilustración 16. Bloque Altavoz-Acelerómetro-Extensor de fibra óptica.	53
Ilustración 17. Acelerómetro piezoeléctrico 4381 Bruel and Kjaer.	54
Ilustración 18. Vibraciones sobre los anclajes superior e inferior de la fibra óptica.	70

CAPTURAS DE PANTALLA

Captura de pantalla 1. Patrón de interferencia.	20
Captura de pantalla 2. Interferograma y vibración acondicionada 1.	20
Captura de pantalla 3. Cleverscope ScopeDisplay.	22
Captura de pantalla 4. Cleverscope Control Panel.	23
Captura de pantalla 5. Panel control VI ejemplo.	24
Captura de pantalla 6. Diagrama de bloques VI ejemplo.	25
Captura de pantalla 7. Archivos Driver LabVIEW.	26
Captura de pantalla 8. VIs Driver LabVIEW.	26
Captura de pantalla 9. Panel frontal Simple Scope.vi.	27
Captura de pantalla 10. Panel frontal Minimun Scope.vi.	28
Captura de pantalla 11. Diagrama de bloques completo Minimun Scope.vi.	28

Captura de pantalla 12. Diagrama de bloques. Etapa 4. Adquisición Minimun Scope.vi.	29
Captura de pantalla 13. Bloque. Minimun Scope.vi.	30
Captura de pantalla 14. Diagrama bloques completo.	34
Captura de pantalla 15. Diagrama de bloques. Definición de parámetros y adquisición de datos.	34
Captura de pantalla 16. Interferograma (Rojo) y tono fundamental (Azul).	36
Captura de pantalla 17. Diagrama de bloques. Demodulación interferograma. .	37
Captura de pantalla 18. Bloque. Frecuencia y Amplitud del tono fundamental. .	37
Captura de pantalla 19. Diagrama de bloques. Demodulación interferograma 2.	38
Captura de pantalla 20. Bloque. Detector de Picos.	39
Captura de pantalla 21. Diagrama de bloques. Cálculo de la elongación.	40
Captura de pantalla 22. Formas de onda Canal A y Canal B.	42
Captura de pantalla 23. Canal B muestra una forma de onda sinusoidal.	43
Captura de pantalla 24. Diagrama de bloques. Cálculo Frecuencia y Elongación Reales.	44
Captura de pantalla 25. Panel Frontal. Ubicación del archivo de datos.	45
Captura de pantalla 26. Diagrama de Bloques. Almacenamiento de datos.	45
Captura de pantalla 27. Panel Frontal.	46
Captura de pantalla 28. Panel frontal. Gráfico Minimun Scope.vi.	46
Captura de pantalla 29. Interferograma y Tono fundamental.	47
Captura de pantalla 30. Diagrama de bloques. Presentación por pantalla Tono fundamental.	47
Captura de pantalla 31. Canal B.	48
Captura de pantalla 32. Porción del Canal A.	48
Captura de pantalla 33. Datos calculados y reales.	49

Captura de pantalla 34. Interferograma y tono fundamental a 500 Hz.	66
--	----

GRÁFICAS

Gráfica 1. Datos amplitud a 100 Hz.	56
Gráfica 2. Calibración de la amplitud a 100 Hz.	56
Gráfica 3. Datos frecuencia a 100 Hz.	58
Gráfica 4. Distribución error en el cálculo de la frecuencia.	59
Gráfica 5. Amplitudes a 200 Hz.	61
Gráfica 6. Histograma del error frecuencias a 200 Hz.	62
Gráfica 7. Amplitudes a 300 Hz.	63
Gráfica 8. Histograma de error frecuencias a 300 Hz.	64
Gráfica 9. Amplitudes a 500 Hz.	65
Gráfica 10. Histograma error frecuencias a 500 Hz.	66
Gráfica 11. Correlación a frecuencia variable.	67
Gráfica 12. Amplitudes a frecuencia variable.	68

Índice de tablas

Tabla 1. Calibración a 100 Hz.....	60
Tabla 2. Calibración a 200 Hz.....	62
Tabla 3. Calibración a 300 Hz.....	64
Tabla 4. Calibración del vibrómetro.....	69
Tabla 5. Especificaciones generador funciones.	77
Tabla 6. Requisitos LabVIEW.	77
Tabla 7. Especificaciones acelerómetro.....	78
Tabla 8. Especificaciones módulo CS328A.....	78

Capítulo 1. Introducción, motivación y objetivos

1.1. Introducción y motivación

La monitorización de los sistemas industriales es una técnica ampliamente establecida en los ámbitos productivos mediante la cual es posible conocer el estado de los procesos y máquinas que se emplean en dicho sistema.

La monitorización se basa en la adquisición de los parámetros característicos de un sistema (presión, temperatura etc.) mediante instrumentación electrónica, y su posterior procesamiento informático y presentación por pantalla. Si a esta lectura de parámetros añadimos un control en función del valor que tomen estos datos entonces es posible el control de los procesos de manera automática. Esta es la base de la industria moderna [1].

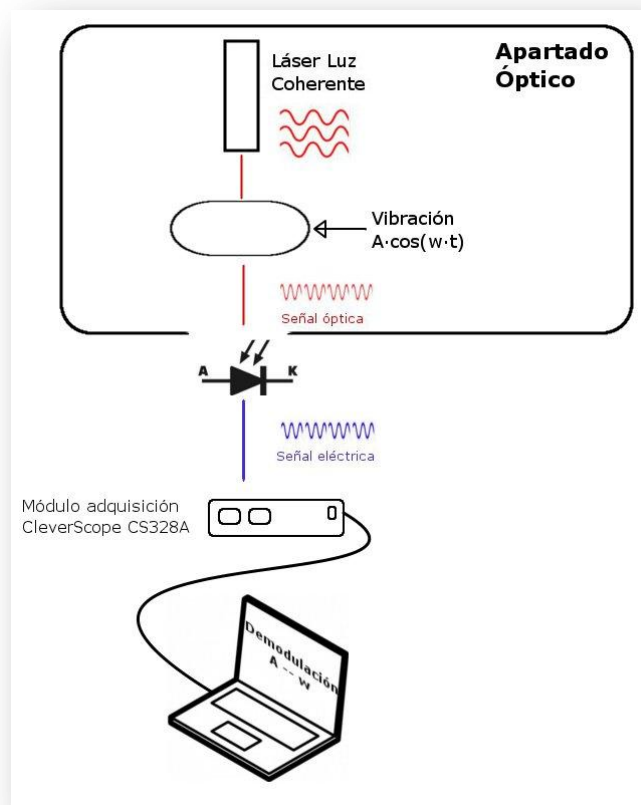
Dentro de la amplia adquisición de datos que se pueden realizar dentro de un proceso industrial se encuentra la monitorización de las máquinas que llevan a cabo esa tarea. Para poder analizar el funcionamiento de una máquina podemos contemplar diferentes variables que describen en mayor o menor medida el funcionamiento de esta. Dentro de los parámetros característicos que podemos medir se encuentran parámetros eléctricos (consumo eléctrico, factor de potencia, distorsión armónica etc.) o parámetros mecánicos entre otros. De entre los parámetros mecánicos, la monitorización de la vibración permite establecer su zona de funcionamiento y realizar un mantenimiento predictivo [2].

Vibrómetro de fibra óptica codificado en frecuencia

Por tanto, la motivación de este proyecto fin de grado es la de estudiar y diseñar un sistema de instrumentación electrónica mediante el cual medir la vibración de una máquina. La importancia reside no solo en el mantenimiento predictivo mediante la monitorización del comportamiento de las máquinas en entornos industriales sino también en el cumplimiento de la normativa [3].

El sistema de instrumentación se ha desarrollado para trabajar en entornos hostiles como en máquinas eléctricas de gran potencia u otros entornos donde los instrumentos queden expuestos. Los vibrómetros electrónicos pueden responder de manera incorrecta debido a la interferencia a la que se exponen y en caso de rotura su coste de sustitución es elevado. Por el contrario, la fibra óptica es barata y no sufre interferencias electromagnéticas. Este es el motivo por el que se ha elegido esta tecnología para desarrollar el vibrómetro.

El análisis de la señal se realizará mediante la herramienta LabVIEW, ya que permite una programación gráfica de manera eficiente y rápida. La adquisición de datos se lleva a cabo mediante el módulo CS328A debido a su alta frecuencia de muestreo y su compatibilidad con LabVIEW [4].



Esquema1. Esquema general del proyecto.

El esquema anterior muestra un diagrama de bloques general del proyecto. En primer lugar se genera la señal mediante un haz de luz coherente que atraviesa la fibra

óptica. Este haz es generado por un láser. La vibración actúa sobre la fibra modificando la longitud de camino óptico. Para la medida se utiliza un interferómetro de fibra óptica. Bajo las condiciones seleccionadas para la amplitud y componentes de frecuencia de las vibraciones, la medida está contenida en la frecuencia de la señal de salida. Posteriormente se obtiene la señal mediante el módulo de adquisición y por último se analiza mediante LabVIEW para obtener los parámetros de la vibración. Adicionalmente, se ha hecho uso de un acelerómetro para la calibración del sistema.

1.2. Objetivos y fases de desarrollo

El objetivo principal de este proyecto es desarrollar un sistema basado en fibra óptica mediante el cual medir la vibración de una máquina. Para poder llevar a cabo este objetivo es necesario el cumplimiento de una serie de subobjetivos.

El primer subobjetivo del proyecto es el estudio de la interferencia de la luz sobre una fibra de longitud variable. Gracias a este estudio podemos conocer la forma de la señal. A partir de esta señal se ha diseñado el algoritmo para extraer la información de la vibración.

El siguiente subobjetivo del proyecto es adquirir la señal mediante el módulo CS328A. Este proporciona una alta velocidad de muestreo para dos canales analógicos que pueden ser visualizados por pantalla. Sin embargo, para tratar posteriormente la señal mediante instrumentos virtuales, es necesario programar los drivers proporcionados por el fabricante.

El tercer subobjetivo es el diseño y programación del algoritmo de demodulación. Mediante LabVIEW se ha desarrollado un instrumento virtual capaz de calcular la frecuencia y la amplitud de la vibración a partir de la señal de interferencia. Este instrumento virtual ha de ser capaz además de analizar la señal proveniente del acelerómetro.

El cuarto y último subobjetivo es la calibración del sistema completo mediante la comparación de las medidas obtenidas a partir del vibrómetro diseñado y de los datos proporcionados por el acelerómetro.

Las fases de desarrollo para la realización del proyecto se corresponden con los objetivos marcados para este.

En primer lugar se realizó un estudio acerca de la forma de onda correspondiente a la salida del interferómetro. Tras la realización de este estudio, se propusieron una

serie de algoritmos de demodulación desarrollando finalmente un instrumento virtual basado en el cálculo de la FTT de ventanas móviles a lo largo de la señal estudiada.

En segundo lugar se realizó la programación de los drivers de adquisición, y se realizaron una serie de lecturas mediante la excitación del interferómetro. Gracias a este paso el sistema quedó preparado para la adquisición de la señal de interferencia y la señal del acelerómetro.

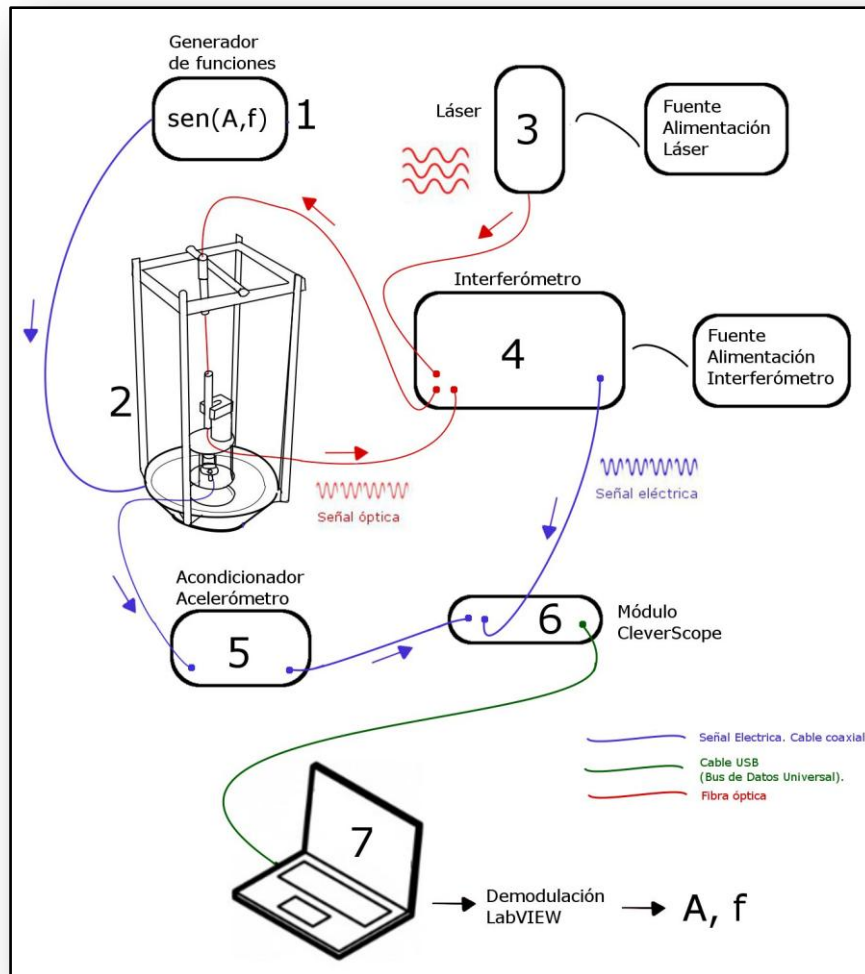
Para la comprobación del sistema desarrollado se construyó un dispositivo mediante el cual simular la vibración de una máquina. La construcción de este dispositivo utilizó como base un altavoz cuya vibración queda controlada mediante un generador de funciones.

Una vez realizados los pasos anteriores se procedió a la realización de numerosas medidas para la calibración del instrumento. Tras la realización de estas medidas se efectuó un estudio del comportamiento del vibrómetro diseñado y se extrajeron las conclusiones del proyecto.

1.3. Medios empleados

La realización de este proyecto ha requerido el uso de varios instrumentos, tanto hardware como software. Para la obtención de la señal del interferograma y del acelerómetro se utilizaron los elementos incluidos en el esquema 3. El listado de estos elementos es el siguiente:

1. Generador de funciones, mediante el cual se controla la frecuencia y amplitud de la vibración simulada.
2. Bloque altavoz-fibra óptica-acelerómetro. Mediante este dispositivo se provoca la elongación sobre la fibra óptica. Esta elongación además se mide a través del acelerómetro.
3. y 4. Láser e interferómetro. Instrumentos mediante los cuales se generarán y combinarán los haces de luz para generar la señal de interferencia.
5. Acondicionador del acelerómetro. Utilizado para calibrar la medida del acelerómetro, ya que cada sensor posee una sensibilidad diferente, y presentar su salida como una tensión.
6. Módulo CleverScope. Tarjeta con la que es posible adquirir tanto la señal del interferómetro como la señal proveniente del acelerómetro.
7. PC. Gracias al instrumento virtual desarrollado será posible la demodulación y el análisis de las formas de onda adquiridas mediante el módulo CS328A.



Esquema 2. Diagrama de bloques completo.

La adquisición de datos y la demodulación se realizó mediante los siguientes programas:

- Cleverscope. Programa con el que es posible observar por pantalla las señales obtenidas mediante el módulo CS328A.
- LabVIEW. Herramienta de programación visual. Mediante los instrumentos virtuales creados con LabVIEW se puede realizar un análisis de las señales, así como la presentación de datos por pantalla y el almacenamiento de estos.

Además, para el estudio de la interferencia de la luz y el análisis de los datos obtenidos mediante el instrumento virtual se utilizaron las siguientes herramientas software:

- Matlab R2011a. Herramienta de software matemático mediante la cual se han realizado todas las simulaciones existentes en la memoria. El código de estas simulaciones se encuentra en los anexos.

- Microsoft Excel 2010. Se ha utilizado el paquete de Office para el análisis de los datos de calibración.

1.4. Estructura de la memoria

Al igual que los objetivos y las fases de desarrollo, la estructura de la memoria está desarrollada siguiendo el orden establecido anteriormente.

Siguiendo este criterio, en el primer capítulo de la memoria (Capítulo 2) se ha estudiado el comportamiento de la luz sobre una fibra óptica. En el entorno del proyecto la luz sufre una interferencia que provoca una señal cuya forma queda definida por la amplitud y la frecuencia de la vibración a la que está sometida. La forma de onda de la interferencia está deducida en este capítulo.

En el tercer capítulo se detallan los medios empleados para la realización del proyecto. Cabe distinguir dos grupos diferentes: el hardware y elementos del laboratorio y el software. Ambos grupos de herramientas están definidos y explicados en este capítulo.

En el cuarto capítulo se incluye el desarrollo de la herramienta virtual utilizada para demodular las señales generadas y adquiridas mediante las herramientas anteriores. Además se explica en detalle el algoritmo diseñado para la obtención de los parámetros de la vibración buscados (frecuencia y amplitud) a partir de la forma de onda proporcionada por el interferómetro.

La comprobación del funcionamiento del vibrómetro completo se realiza en el quinto capítulo. Aquí se explican el método seguido para la simulación de la vibración. Tras la toma de datos a distintas frecuencias y amplitudes se ha realizado un estudio de calibración del instrumento.

Por último, en el sexto capítulo se establecen las conclusiones acerca del cumplimiento de los objetivos marcados para este proyecto.

Capítulo 2. Principio de funcionamiento.

En este capítulo se describe en primer lugar el apartado óptico del experimento. Esta sección comprende desde el láser que genera el haz de luz coherente hasta el fotodiodo, que convierte la señal óptica a señal eléctrica.

Tras el apartado electroóptico del proyecto, obtenemos una señal eléctrica con la información suficiente para describir la vibración a la que es sometida la fibra óptica. Para deducir la señal eléctrica con la que se ha trabajado en el apartado de demodulación es necesario conocer algunos principios físicos.

El experimento se basa en la superposición e interferencia de la luz en un interferómetro. Este instrumento es ampliamente conocido, y, dado que es la base del apartado físico del proyecto, ha sido descrito y explicado en este capítulo. La mayor diferencia respecto al Interferómetro clásico de Michelson será que en este caso utilizaremos fibra óptica como medio para propagar la luz en un esquema de Mach-Zehnder.

La señal eléctrica que obtenemos es producto de la interferencia de dos haces de luz. Uno de estos haces se propaga a través de una fibra óptica cuya longitud es fija, y el otro haz de luz es propagado a través de una fibra óptica cuya longitud coincide con la longitud propia mas una elongación igual a la amplitud de la vibración. La interferencia de los dos haces de luz en función del tiempo resulta en la señal que estamos buscando.

2.1. Interferencia de la luz

La luz es la propagación electromagnética a lo largo del vacío de ondas perceptibles por el ojo humano o cuyo espectro es cercano al visible (infrarrojo, ultravioleta). La luz, al igual que todas las partículas, tiene la propiedad cuántica de desplazarse en línea recta y como una onda. A esta propiedad se la denomina Dualidad Onda Corpúsculo. Según este hecho, podemos describir la luz como la suma de ondas electromagnéticas.

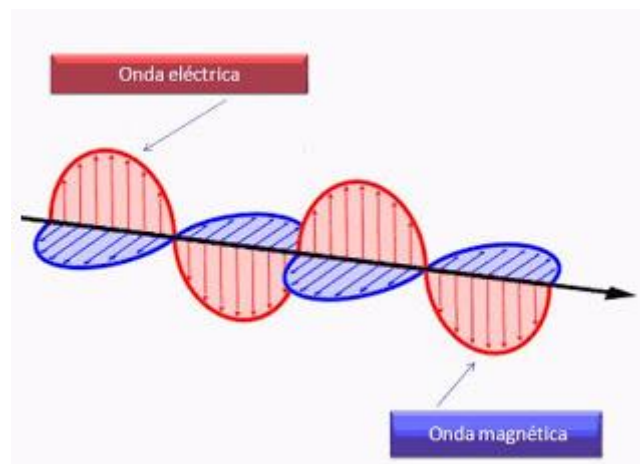


Ilustración 1. Onda electromagnética.

Una onda electromagnética queda caracterizada principalmente por sus características de propagación (frecuencia, periodo o longitud de onda, amplitud, etc.). Para presentar el comportamiento de las ondas luminosas en propagación e interferencia puede tomarse como referencia una sinusoidal.



Ilustración 2. Onda sinusoidal.

La velocidad de propagación de la luz es constante en el vacío sea cual sea su longitud de onda y su amplitud. Esta constante se denomina c y toma el valor de 300000 m/s aproximadamente.

La longitud de onda de un haz de luz es inversamente proporcional a su frecuencia, y nos indica el tipo de onda electromagnética que es. Si la longitud de la onda electromagnética se sitúa en el intervalo de visión del ojo humano entonces estamos ante luz visible (400 nm a 750 nm).

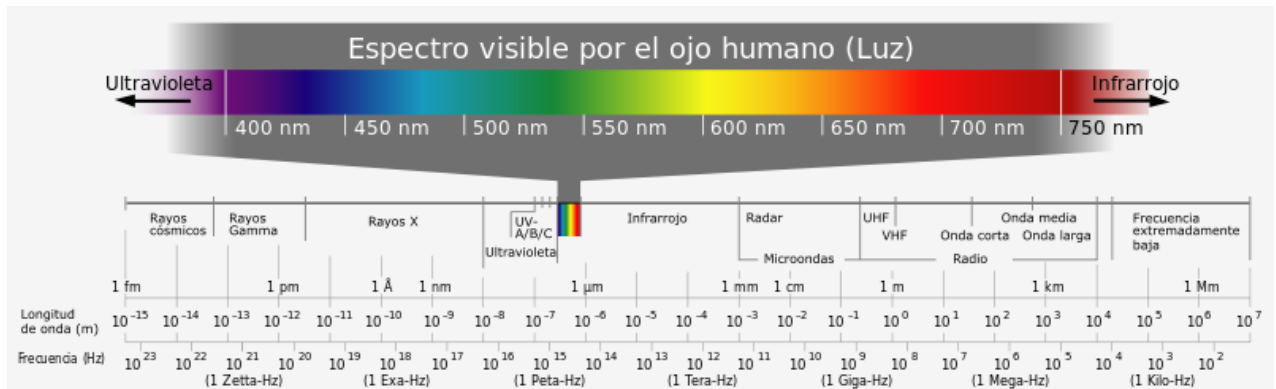


Ilustración 3. Espectro electromagnético.

La luz emitida desde una fuente convencional es un conjunto de fotones que se mueven dentro de un rango de longitudes de onda. La suma de todas las ondas con diferentes frecuencias dará como resultado luz blanca o sin color.

Sin embargo, para generar una señal óptica que nos permita demodular la vibración aplicada a la fibra es necesario utilizar una señal puramente sinusoidal. La luz monocromática tiene una única frecuencia que caracteriza su color, sin embargo no es adecuada para el experimento pues aunque posee una misma longitud de onda, los haces de fotones están desfasados unos con otros. Es por tanto necesario generar un haz de luz de la misma frecuencia y en el que todos los fotones estén en fase. Los haces de fotones con estas características se denominan luz coherente.

La luz coherente tiene como principal característica que todos los fotones que la componen están en fase, y además se desplaza en la misma dirección en el vacío sin disminuir su intensidad. La luz coherente no se da de manera espontánea en la naturaleza, por lo que es necesario provocarla deliberadamente. Para conseguir este propósito se utilizan los láseres. El láser (del inglés LASER, Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation. Amplificación de Luz por la Emisión Estimulada de Radiación) es un dispositivo capaz de generar un haz de luz coherente cuyos parámetros son conocidos. Así pues, el láser generará una onda electromagnética de longitud de onda constante y en fase.

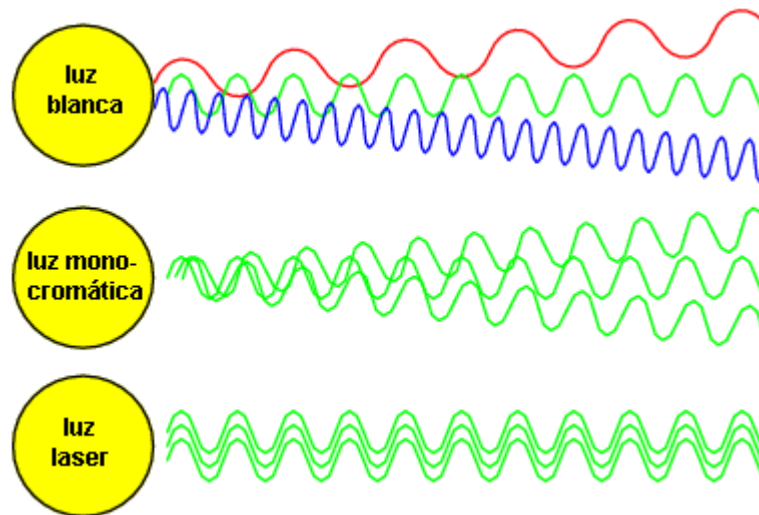


Ilustración 4. Diferentes tipos de luz.

Dado que la luz es una onda, esta se rige por el fenómeno de interferencia. Esto significa que dos ondas electromagnéticas pueden ser sumadas dando como resultado una tercera onda. La interferencia de las ondas puede ser constructiva o destructiva.

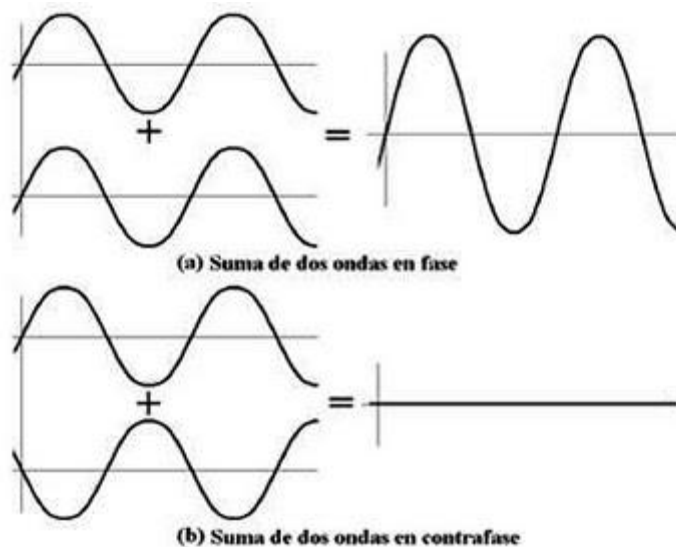


Ilustración 5. Interferencia de las ondas.

Como se aprecia en la Ilustración 5, la interferencia de las ondas se puede modelar matemáticamente como la suma de las ondas sinusoidales. Si las ondas son de la misma frecuencia y sin desfase se obtendrá una nueva onda con doble amplitud y misma frecuencia; si por el contrario están desfasadas 180 grados, las ondas se cancelarán entre sí.

La interferencia producida por dos ondas de luz que se mueven en la misma dirección, con sus vectores de campo en el mismo plano y que además poseen la misma frecuencia resulta en un campo igual a [5]:

$$E = E_1 + E_2$$

La intensidad de la señal óptica es el cuadrado del campo eléctrico, por tanto la intensidad de la señal de interferencia a partir de la ecuación anterior es:

$$I = E_1^2 + E_2^2 + 2E_1E_2 = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1I_2}\cos(\Delta\phi)$$

Siendo I_1 e I_2 la intensidad de las ondas de interferencia y $\Delta\phi$ el desfase entre ellas. Dado que el origen de las ondas es común, la diferencia de fase se corresponde con la diferencia de camino óptico recorrido. Esta diferencia de fase tiene la siguiente forma:

$$\phi = knL$$

Donde k corresponde con el número de onda óptico ($2\pi/\lambda$), n es el índice de refracción del medio y L la longitud del camino recorrido. Por lo tanto, el cambio de fase está directamente relacionado con la variación de la longitud del camino recorrido por las ondas de luz.

En el interferómetro utilizado, a la salida se obtienen dos señales ópticas:

$$I_a = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1I_2}\cos(\Delta\phi)$$

$$I_b = I_1 + I_2 - 2\sqrt{I_1I_2}\cos(\Delta\phi)$$

Si simplificamos estas ecuaciones, obtenemos la potencia óptica de la interferencia:

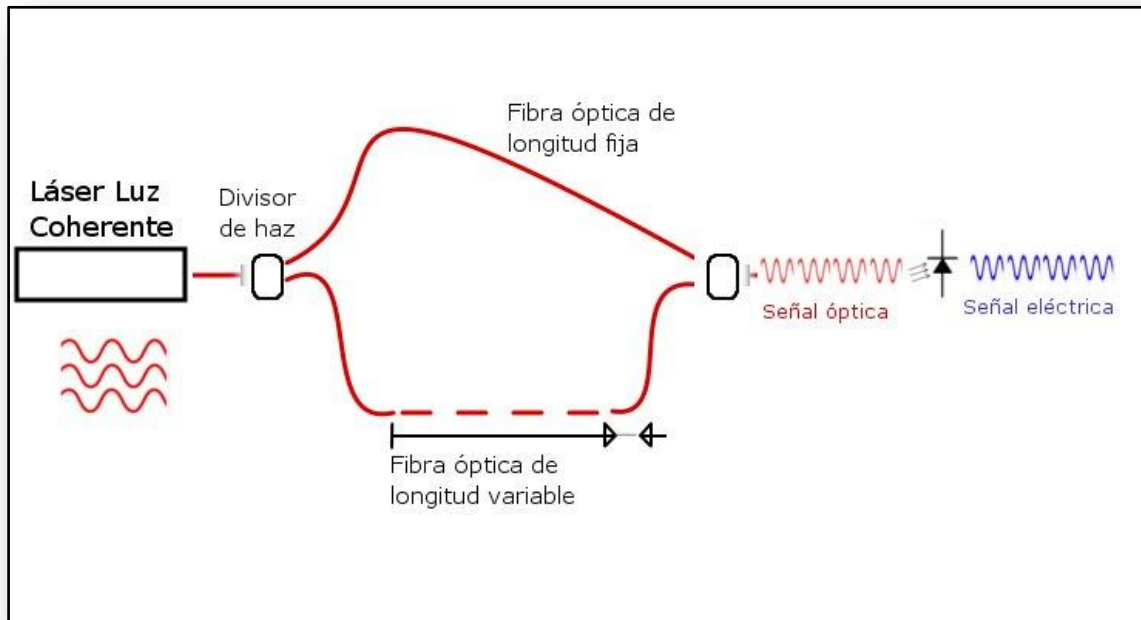
$$I_{ab} = I_0[1 \pm V \cos(\Delta\phi)]$$

Donde I_0 es la potencia óptica media y V representa un factor de calidad de interferencia denominado visibilidad. Este puede tomar valores desde 0 a 1.

$$V = \frac{I_{max} - I_{min}}{I_{max} + I_{min}}$$

Aquí I_{max} e I_{min} representan la intensidad máxima y la intensidad mínima de la señal.

2.2. Medida de la vibración



Esquema 3. Esquema óptico del interferómetro.

El Esquema 2 muestra el conexionado básico de la fibra óptica realizado para medir la vibración. La parte óptica del experimento cuenta con los siguientes elementos:

- Láser de luz coherente. Proporciona un haz de luz infrarroja de 633 nm.
- Fibra óptica monomodo. La luz del láser se propaga a través de la fibra óptica.
- Divisor de haz. Un espejo semirreflectante divide el haz de luz proveniente del láser.
- Fotodiodo. El fotodiodo transduce la señal óptica en señal eléctrica.

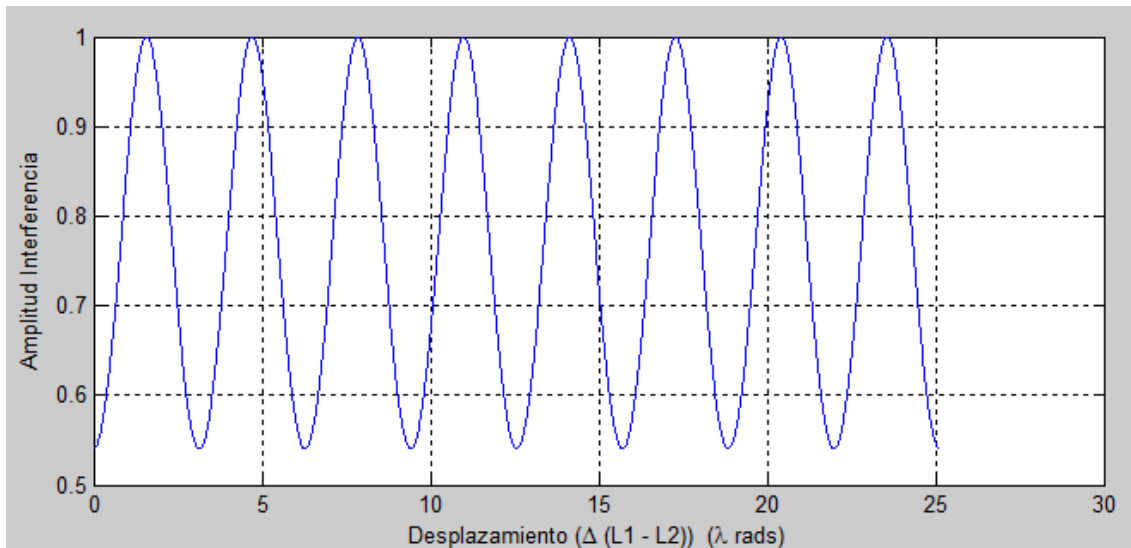
Para conocer la forma de onda de la señal eléctrica que obtenemos tras la sección electroóptica del experimento es necesario conocer el principio físico sobre el que se basan los interferómetros.

Si la longitud L_2 (longitud variable) es igual a la longitud L_1 (longitud fija), entonces en el punto O observaremos una interferencia constructiva de ondas. Si por el contrario, la longitud no es igual, entonces los dos haces de luz no recorrerán la misma longitud, y por lo tanto en el punto O habrá un desfase entre los haces y la interferencia dejará de ser totalmente constructiva (excepto si la diferencia entre L_1 y L_2 es exactamente igual a un número entero de longitudes de onda).

Partiendo de la ecuación:

$$I_{ab} = I_0[1 \pm V \cos(\Delta\phi)]$$

La forma de onda obtenida para un desplazamiento de fase constante es la siguiente:



Simulación 1. Amplitud de la interferencia en función del incremento de la diferencia de longitud de los haces recorridos.

En la Simulación 1 se observa como varía la amplitud de la onda de interferencia según aumenta la diferencia de longitud de los caminos recorridos por los haces. Como se puede observar, la forma de onda es periódica, lo cual indica que efectivamente la amplitud de la onda de interferencia es máxima cuando el desplazamiento es igual n veces la longitud de onda. Se puede aproximar un desplazamiento de una longitud de onda por cada uno de los periodos del interferograma [6].

$$\cos(0) = \cos(2\pi) = \cos(4\pi) = \cos(6\pi) = \cos(8\pi) = 1$$

$$n = 0 \rightarrow \text{Desplazamiento} = 0 \cdot 2\pi \cdot \lambda = 0 \lambda \text{ rads} = 0\lambda$$

$$n = 1 \rightarrow \text{Desplazamiento} = 1 \cdot 2\pi \cdot \lambda = 6.28 \lambda \text{ rads} = 1\lambda$$

$$n = 2 \rightarrow \text{Desplazamiento} = 2 \cdot 2\pi \cdot \lambda = 12.56 \lambda \text{ rads} = 2\lambda$$

$$n = 3 \rightarrow \text{Desplazamiento} = 3 \cdot 2\pi \cdot \lambda = 18.84 \lambda \text{ rads} = 3\lambda$$

$$n = 4 \rightarrow \text{Desplazamiento} = 4 \cdot 2\pi \cdot \lambda = 25.13 \lambda \text{ rads} = 4\lambda$$

Por lo tanto, contando el número de picos de una señal como la producida en la Simulación 1 podemos conocer el desplazamiento que ha ocurrido, ya que el desplazamiento será aproximadamente igual al número de picos por la longitud de onda:

$$\Delta L = n^{\circ} \text{picos} \cdot \lambda$$

Si en lugar de aplicar un desplazamiento constante como se ha realizado en la Simulación 1, realizamos un desplazamiento periódico obtenemos la forma de onda del interferograma. Si partimos de la ecuación de la amplitud de la onda resultado de la interferencia:

$$I_{ab} = I_0 [1 \pm V \cos(\Delta\phi)]$$

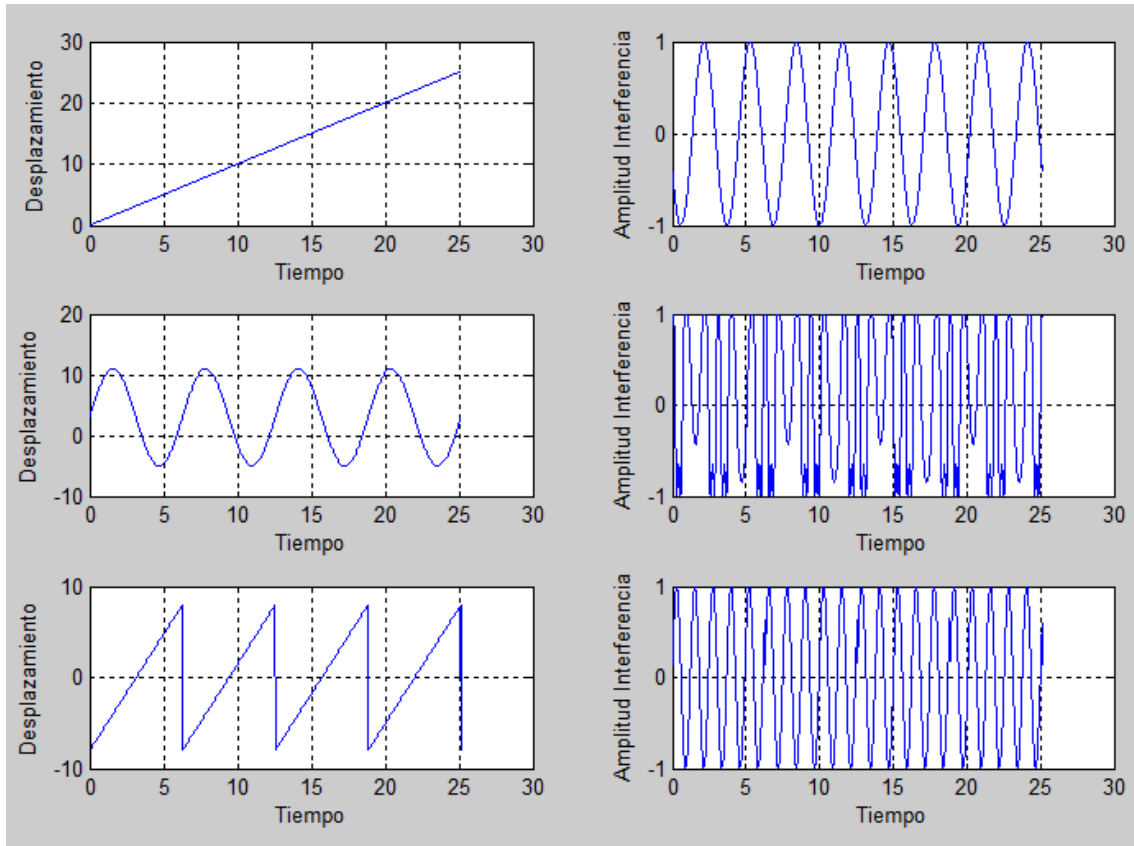
Al aplicar un desplazamiento periódico obtendremos la forma de onda típica del interferograma:

$$I_{ab} = \cos^2(A \cdot \cos(w \cdot t) + \phi)$$

Esta ecuación representa la forma de onda de la salida del interferómetro si uno de los caminos que ha de recorrer la luz sufre una elongación de amplitud A, frecuencia $w/2\pi$ y desfase ϕ , es decir, si uno de los caminos sufre una elongación periódica. Esta elongación puede ser producida por una vibración.

En la Simulación 2 se ha representado el interferograma provocado si a uno de los caminos que ha de recorrer la luz se le aplicara un desplazamiento a velocidad constante (1), sinusoidal (2) y diente de sierra (3).

Para calcular las formas de onda se ha sustituido ϕ de la ecuación general del interferograma por la ecuación de una recta (1) y la ecuación de la forma de onda diente de sierra (3). La ecuación para la vibración sinusoidal corresponde con la ecuación calculada anteriormente.



Simulación 2. Interferogramas de desplazamiento constante, vibración sinusoidal y vibración diente de sierra.

La vibración típica de una máquina o mecanismo es de forma sinusoidal (sin armónicos o con armónicos de frecuencia cercana a la fundamental y de baja amplitud) ya que los sistemas físicos eliminan los armónicos de alta frecuencia. Por tanto, a la hora de calcular la función del interferograma utilizaremos como elongación en uno de sus brazos funciones sinusoidales.

Una vez conocemos la forma de onda más probable a la hora de medir una vibración, es necesario estimar el rango de frecuencias que vamos a medir. La frecuencia de la red en Europa es de 50 Hz. Sería entonces previsible que la vibración más probable se acercase a los 50 Hz de la frecuencia de la red.

$$V_{inst} = \sqrt{2} \cdot 220 \cdot \sin(2\pi \cdot 50\text{Hz} \cdot t)$$

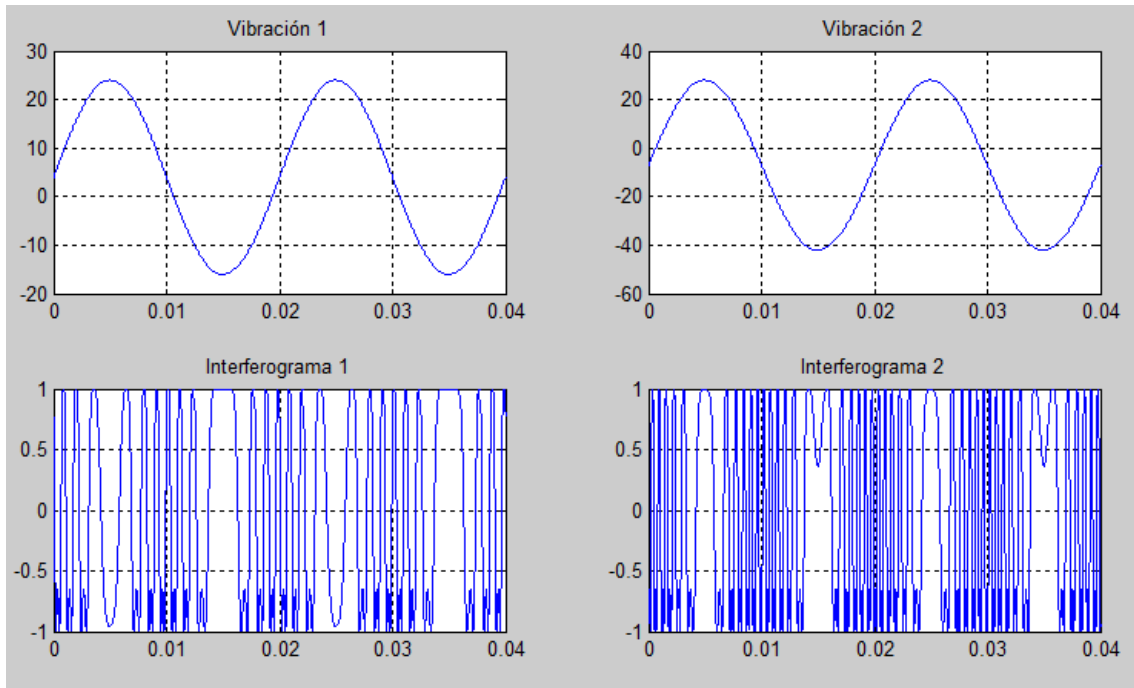
Sin embargo, la vibración se acopla generalmente con el consumo de potencia. Para una carga resistiva (sin componente reactiva) no existe desfase entre la corriente y el voltaje.

Vibrómetro de fibra óptica codificado en frecuencia

$$\begin{aligned} P_{inst} &= V_{inst} \cdot I_{inst} = 311 \cdot \text{sen}(2\pi \cdot 50\text{Hz} \cdot t) \cdot \frac{311}{R_{carga}} \cdot \text{sen}(2\pi \cdot 50\text{Hz} \cdot t) \\ &= \frac{1}{2} \frac{311^2}{R_{carga}} (1 - \cos(4\pi \cdot 50\text{Hz} \cdot t)) \end{aligned}$$

Luego la potencia consumida de una red de 50 Hz por una carga tendrá el doble de frecuencia. Esto sucede tanto si la carga es resistiva como si no lo es. La frecuencia de oscilación de la potencia consumida por una red de 50 Hz será siempre del doble. Por lo tanto, la frecuencia más probable de oscilación serán 100 Hz o los armónicos de esta frecuencia. [7]

Así pues, la vibración que se estudiará en el laboratorio será una onda sinusoidal de frecuencia igual a 100 Hz, o múltiplos de 100 Hz. A continuación se muestra una simulación de las formas de ondas típicas que obtendremos a la salida del interferómetro:



Simulación 3. Formas de onda del interferograma.

Capítulo 3. Adquisición de datos mediante hardware y software

En este capítulo se ha explicado los elementos necesarios para la adquisición de una señal mediante el módulo de adquisición de datos CS328A. En este proyecto no solo es necesario observar la señal obtenida tras el interferómetro, sino que será necesario también el tratamiento de esta señal. Por esta razón además del software de CleverScope para la visualización de la señal será imprescindible integrar la adquisición de la señal mediante el software CleverScope con el tratamiento que llevaremos a cabo mediante LabVIEW.



Ilustración 6. Cleverscope CS328A.

CleverScope es una compañía dedicada a la fabricación de dispositivos de adquisición, generación y análisis de señales. Dentro de los productos que ofrece está el módulo CS328A. Se trata de un instrumento capaz de adquirir señales analógicas con una frecuencia de muestreo muy alta y enviarlas mediante USB a un ordenador conectado.

Para comprobar si la frecuencia de muestreo es suficiente podemos realizar los siguientes cálculos. Aunque según el Teorema de Nyquist solo es necesario muestrear al doble de frecuencia para obtener la señal, para obtener una señal nítida partiremos de la premisa de requerir como mínimo 10 muestras por periodo de la señal sinusoidal.

Si la señal es de una frecuencia de como máximo de 500 Hz, y en cada periodo de vibración hay un máximo de 100 periodos de interferencia, entonces:

$$\begin{aligned} N^{\circ} \frac{\text{muestras}}{\text{segundo}} &= 500 \text{ Hz} \cdot 100 \frac{T \text{ interferencia}}{T \text{ vibración}} \cdot 10 \text{ Muestras} = 500\,000 \frac{\text{muestras}}{\text{segundo}} \\ &= 0.5 \text{ MS/s} \end{aligned}$$

Para obtener una señal nítida es necesario muestrear como mínimo a 0.5 MS/s, requisito sobradamente cumplido ya que la tarjeta proporciona una frecuencia de muestreo de 100 MS/s.

3.1. Interferómetro

La señal adquirida mediante el módulo CS328A es la salida del interferómetro. Además se observa la señal proveniente de un acelerómetro que se mueve al mismo ritmo que la elongación de la fibra óptica. Para excitar tanto la fibra óptica como el acelerómetro se ha utilizado un altavoz cuya amplitud y frecuencia están controladas por un generador de funciones.

La elongación producida sobre la fibra óptica del interferómetro provoca una señal de salida de este con un patrón similar al estudiado en los capítulos anteriores. El interferómetro sigue un esquema similar al representado en la Ilustración 7 [8].

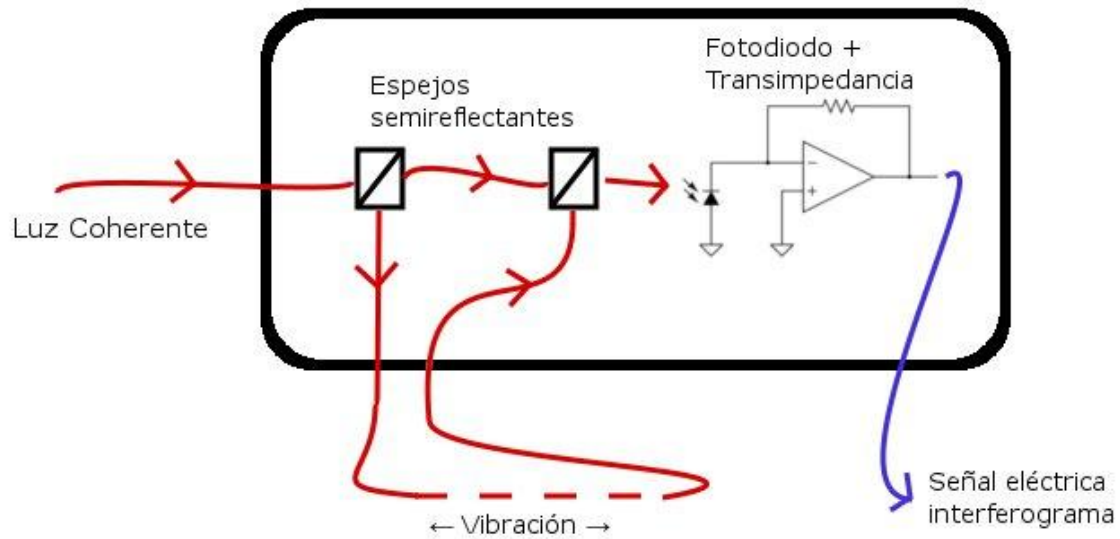


Ilustración 7. Esquema completo del interferómetro.

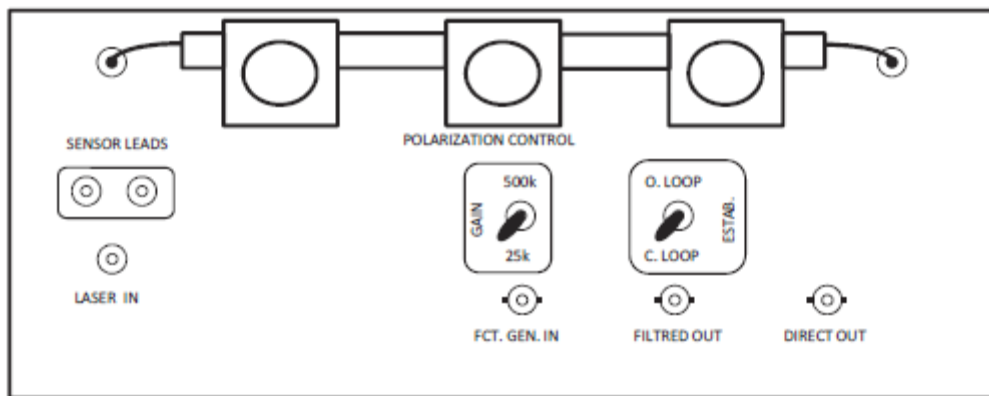


Ilustración 8. Interferómetro.

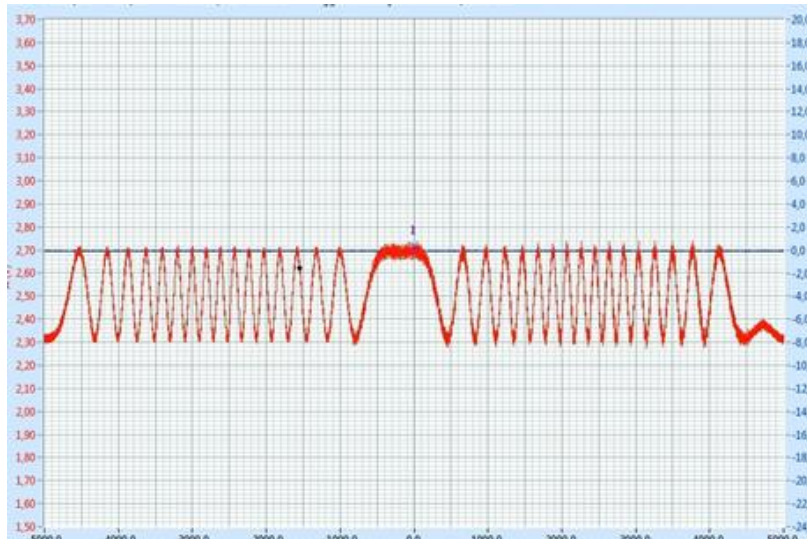
En la Ilustración 8 se puede observar el esquema completo del interferómetro. Posee tres entradas para la fibra óptica. La entrada de la luz coherente corresponde con la entrada LASER IN de la Ilustración 8. La entrada y salida de la fibra óptica sometida a la vibración se encuentran unos 2 cm por encima de la entrada de la fibra óptica proveniente del láser (SENSOR LEADS). La salida de la señal eléctrica corresponde al último cable coaxial situado en el margen inferior derecho (DIRECT OUT).

Aunque en los esquemas no se han incluido, el interferómetro cuenta con elementos como filtros electrónicos y excitadores piezoeléctricos. Dado que la complejidad de este instrumento es elevada, en el proyecto se le tratará como una caja negra de la cual obtenemos una señal eléctrica (el interferograma). Por tanto, en lugar de desarrollar el complicado sistema de transducción, estudiaremos simplemente la salida del interferómetro.

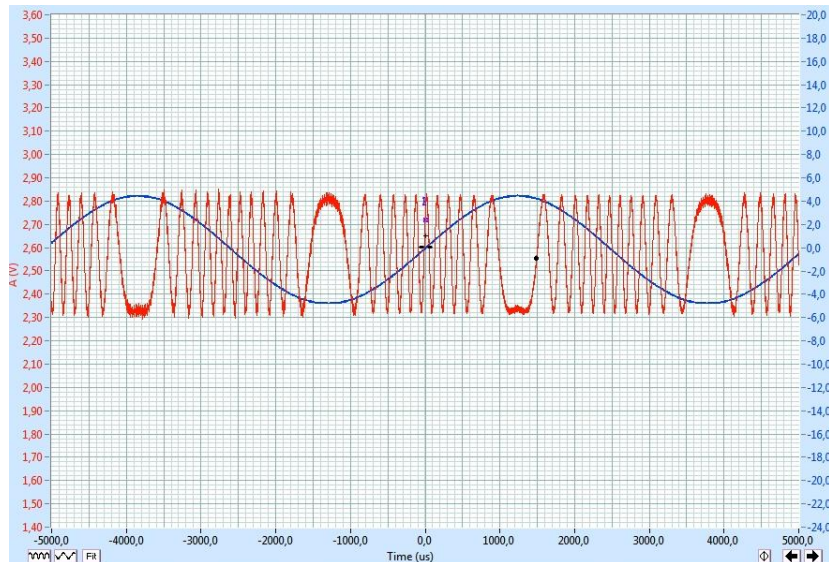
Vibrómetro de fibra óptica codificado en frecuencia

La señal eléctrica que obtenemos se caracteriza por tener un valor medio en torno a los 2.55 V y una amplitud que varía de los 0.5V a los 0.3V.

En la Captura de pantalla 1 podemos observar en rojo la señal obtenida a la salida del interferómetro. Se observa claramente como la señal tiene la forma predicha en los capítulos anteriores. La señal azul corresponde a la señal de aceleración acondicionada proporcionada por el acelerómetro. El acondicionamiento de la señal del acelerómetro se explicará en el siguiente capítulo.



Captura de pantalla 1. Patrón de interferencia.



Captura de pantalla 2. Interferograma y vibración acondicionada 1.

En las Capturas de pantalla 1 y 2 se observa como el valor medio de la señal se sitúa en torno a los 2.55V y la amplitud de la señal puede variar desde los 0,3 V

(captura 1) a los 0,5 V (Captura 2). Una vez hemos definido las características de la señal de salida del interferómetro, no es necesario desarrollar el complejo funcionamiento de este instrumento.

La alimentación del interferómetro se hará a ± 15 V mediante el uso de una fuente de alimentación del laboratorio.

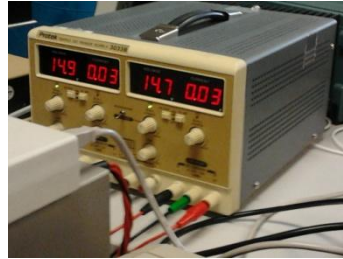


Ilustración 9. Fuente de alimentación del interferómetro.

La fuente de alimentación estará conectada a la red (220 V, 50 Hz) y proporcionará una potencia consumida por el interferómetro de aproximadamente 1 W:

$$P = V \cdot I = 2 \cdot 15 \text{ V} \cdot 0.03 \text{ A} = 0.9 \text{ W}$$

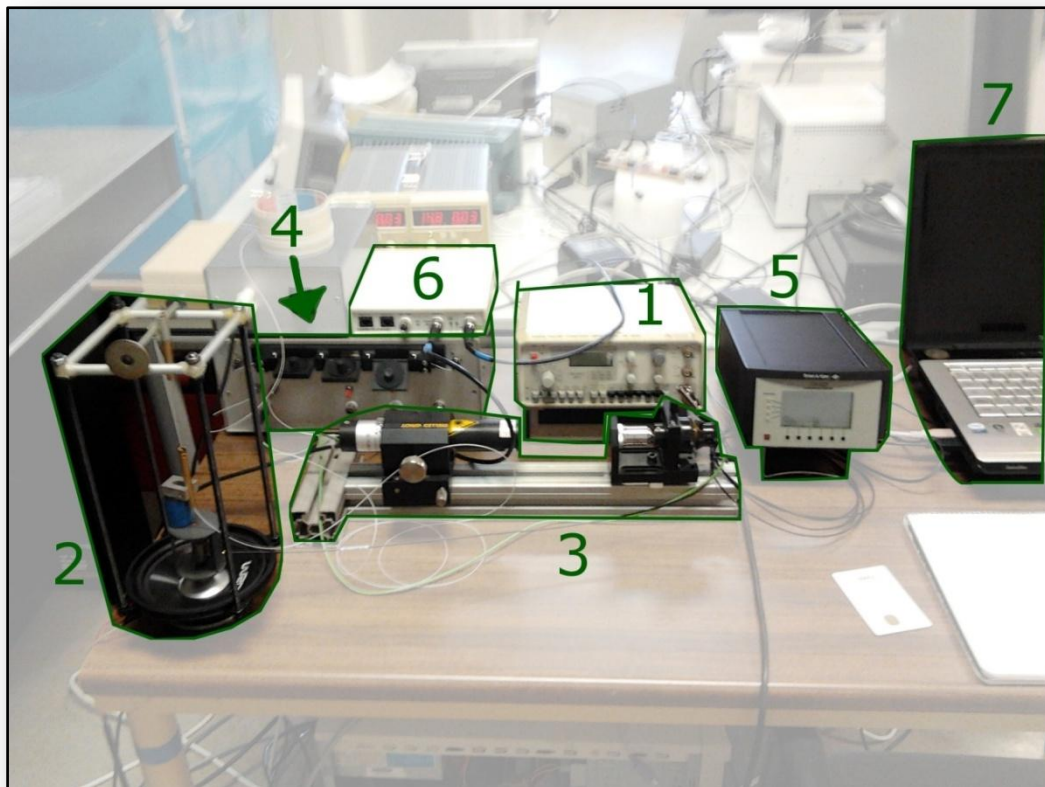


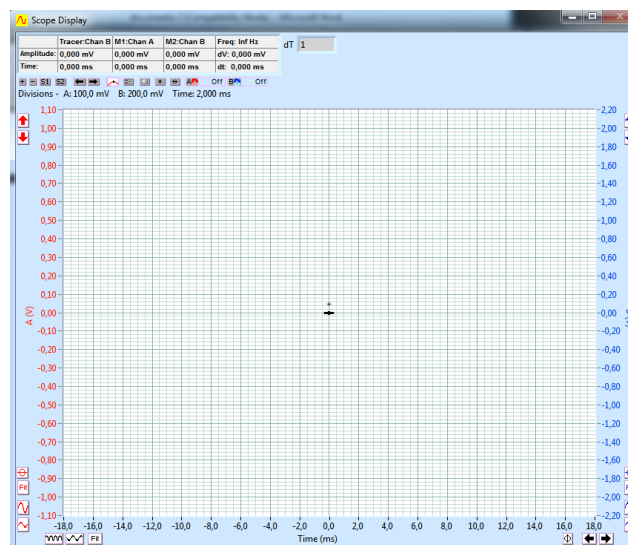
Ilustración 10. Set up completo de laboratorio.

El interferómetro se corresponde con el instrumento número 4 de la ilustración anterior.

3.2. Software Cleverscope

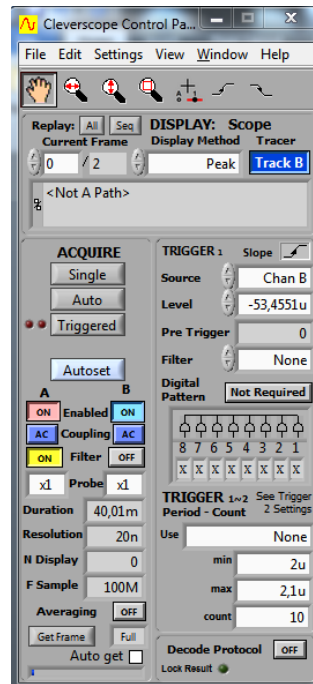
La empresa CleverScope facilita de manera gratuita el software necesario para la visualización y adquisición de una señal mediante su módulo de adquisición CS328A. Los archivos de instalación del software Cleverscope se encuentran en la página web de la compañía (<http://www.cleverscope.com/resources/>). Una vez instalado el software Cleverscope visualizaremos una pantalla similar a la siguiente:

Las capturas de pantalla anteriores muestran en la ventana del software de CleverScope dos señales: el interferograma en rojo, y la salida del acondicionador del acelerómetro en azul. La visualización de las señales se realiza en la pantalla Scope Display.



Captura de pantalla 3. Cleverscope ScopeDisplay.

El software Cleverscope permite además modificar las escalas mostradas por pantalla (tanto en el eje x como en el eje y) y añadir o quitar offset, como si de un osciloscopio se tratara. También permite aplicar filtros para eliminar el ruido de la señal, seleccionar el método de adquisición (adquisición única, continua o mediante disparo). Todas estas opciones se controlan mediante la ventana Cleverscope Control Panel.



Captura de pantalla 4. Cleverscope Control Panel.

El software de CleverScope posee la opción de trabajar directamente con software externo como Matlab o Excel, proporcionando así una capacidad de análisis mediante software convencional. Sin embargo, para este proyecto es necesario un análisis de la señal más complejo, por lo que se requerirá el uso de un instrumento virtual, programado mediante LabVIEW. Para desarrollar ese instrumento virtual será necesario obtener los datos el módulo de adquisición CleverScope 328A. Para realizar esa tarea será necesaria la instalación de una serie de drivers que permitirán la comunicación entre el hardware de CleverScope (módulo CS328A) y el software de LabVIEW.

3.3. Driver LabVIEW

La mayor parte de este proyecto consiste en el diseño de un algoritmo de demodulación y su programación en un entorno virtual. Para llevar a cabo esta tarea la herramienta más adecuada es el software LabVIEW.

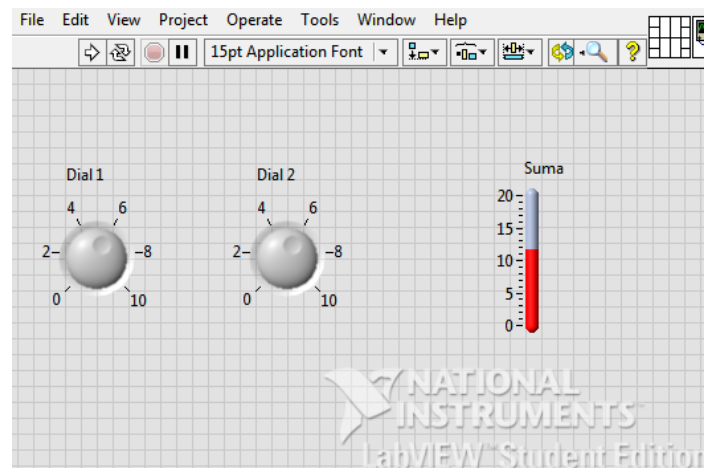
LabVIEW (de sus siglas en inglés Laboratory Virtual Instrumentation Engineering Workbench) es una plataforma de programación visual (o lenguaje de programación G). Pertenece a la compañía norteamericana National Instruments. Está indicado para el desarrollo de aplicaciones y sistemas que incluyan hardware y software, facilitando el desarrollo de sistemas de adquisición de datos, control e instrumentación, procesamiento de señales y comunicaciones.



Ilustración 11. Logo LabVIEW.

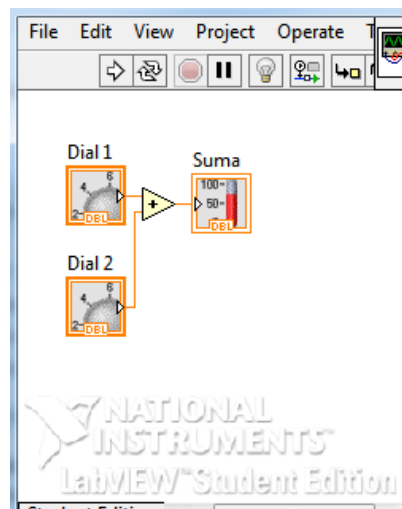
Cada programa desarrollado mediante esta herramienta se denomina VI (Virtual Instrument, Instrumento Virtual). Un VI posee dos partes: El panel frontal y el diagrama de bloques.

El panel frontal es una ventana en la que se incluyen todos los controles sobre los que el usuario puede actuar, así como marcadores para conocer en tiempo real los datos que está manejando el programa.



Captura de pantalla 5. Panel control VI ejemplo.

Diagrama de bloques. En esta ventana se realiza la programación propiamente dicha. LabVIEW se basa en el flujo de datos. Así cada vez que se resuelve un nodo se pasa al siguiente de manera que es posible conocer el orden en el que se realizarán las operaciones y como fluirán los datos del programa.



Captura de pantalla 6. Diagrama de bloques VI ejemplo.

En el VI creado anteriormente como ejemplo se ha programado una suma. El usuario introduce los datos mediante los dos diales y obtiene la suma en la escala del panel frontal. La programación de dicha suma se realiza en el diagrama de bloques.

Mediante LabVIEW es posible la comunicación entre uno o más Vis, de manera que el tamaño de los diagramas de bloques se reduce para programas más complicados. Este es el caso de nuestro VI de demodulación.

Como se ha mencionado antes, la demodulación del interferograma para obtener los parámetros básicos de la vibración (amplitud y frecuencia fundamentales) requiere un algoritmo complejo, por lo que será necesaria la utilización de un instrumento virtual diseñado para tratar con señales. Para programar dicho instrumento virtual se hará uso de LabVIEW 2012. Para obtener señales mediante el módulo CS328A y demodularlas mediante un instrumento virtual es imprescindible la instalación de los drivers necesarios para la comunicación entre el hardware (módulo CS328A) y el software. Dichos drivers se encuentran, al igual que el software Cleverscope, en la página web de la compañía CleverScope (<http://www.cleverscope.com/resources/#resource30>).

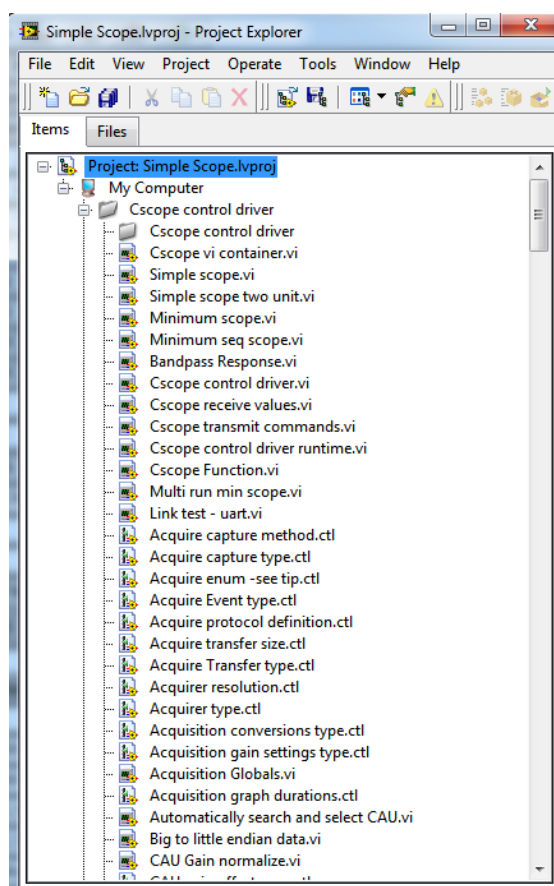
Es importante que la versión del driver descargada coincida con la versión de LabVIEW utilizada, en este caso la versión 2012. El driver a descargar e instalar será Cscope Control LV2012 V2.6. El driver se compone de una serie de instrumentos virtuales compatibles con LabVIEW:

Vibrómetro de fibra óptica codificado en frecuencia

Nombre	Fecha de modifica...	Tipo	Tamaño
Builds	22/04/2013 21:05	Carpeta de archivos	
Adquisicion de datos	25/06/2013 17:43	LabVIEW Instrume...	114 KB
Bandpass Response	20/08/2007 16:31	Icono	2 KB
Cscope Control Driver vi description	02/04/2013 11:21	Archivo PDF	830 KB
Cscope control driver	19/06/2013 15:35	LabVIEW LLB	14.657 KB
FTD2XX.dll	22/01/2006 20:10	Extensión de la apl...	80 KB
Minimum scope averaging in unit	26/07/2012 21:35	LabVIEW Instrume...	374 KB
Minimum scope two unit slaved	28/02/2013 11:02	LabVIEW Instrume...	517 KB
Minimum scope	13/08/2009 18:21	Icono	2 KB
Read me on build exe	10/04/2009 11:11	Documento de tex...	1 KB
Sequential scope	12/11/2009 12:15	Icono	2 KB
Simple scope 2	14/02/2009 15:01	Icono	2 KB
Simple scope big buffer	02/08/2012 16:02	LabVIEW Instrume...	950 KB
Simple Scope.aliases	25/06/2013 15:38	Archivo ALIASES	1 KB
Simple scope	20/08/2007 20:43	Icono	2 KB
Simple Scope.lvps	24/06/2013 20:28	Archivo LVLPs	3 KB
Simple Scope	24/06/2013 20:28	LabVIEW Project	67 KB

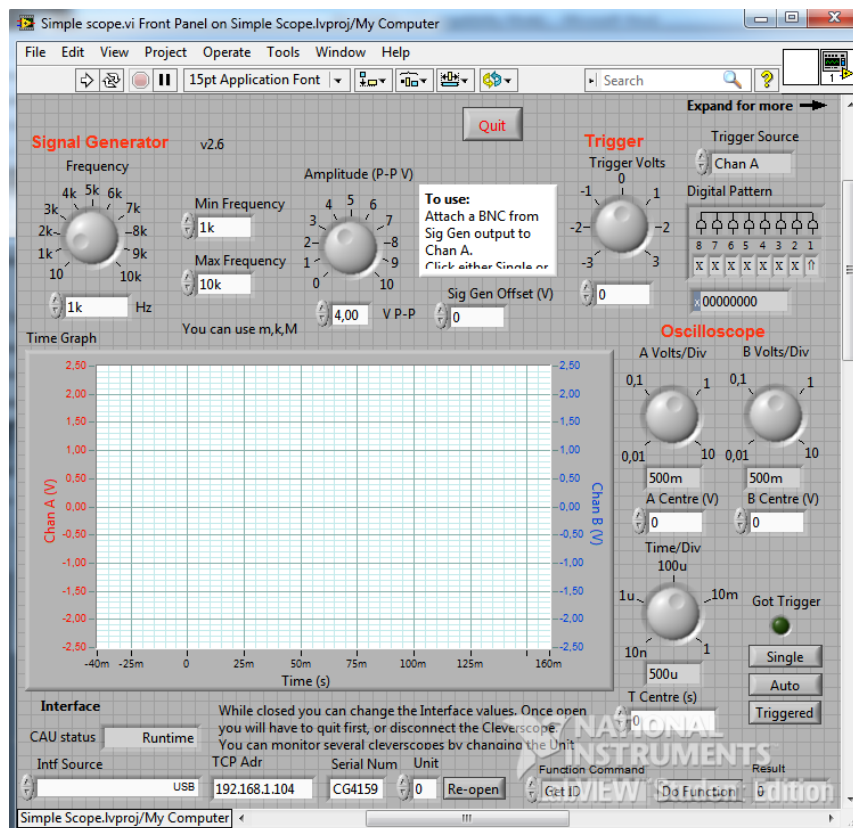
Captura de pantalla 7. Archivos Driver LabVIEW.

Dentro del proyecto de LabVIEW Simple Scope se encuentran todos los VIs y controles necesarios para la adquisición de una señal mediante el módulo CS328A.



Captura de pantalla 8. VIs Driver LabVIEW.

Cada uno de los instrumentos virtuales contenidos en el proyecto del driver para LabVIEW posee unas características. El instrumento virtual más sencillo para simular la adquisición de una señal de manera similar a un osciloscopio es el Simple Scope.vi. Mediante este instrumento virtual podremos obtener de manera continua una señal con una frecuencia de muestreo igual al máximo proporcionado por el módulo de adquisición (100 MS/s).

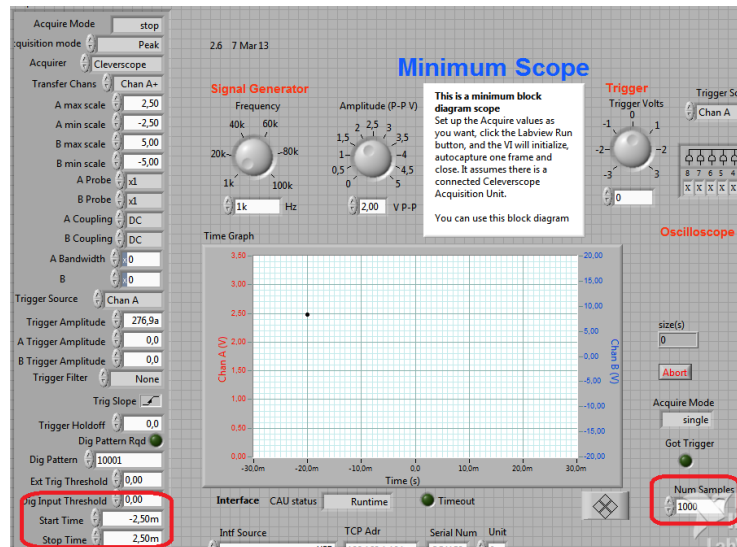


Captura de pantalla 9. Panel frontal Simple Scope.vi.

Sin embargo en nuestro caso no es necesario obtener el interferograma de manera continua. Bastará en nuestro caso con tomar una muestra del interferograma cada cierto tiempo y demodularla. Así pues podremos programar el VI para que calcule la vibración de la máquina con un periodo mínimo que coincidirá con el tiempo de ejecución del instrumento virtual. Por tanto, será necesaria una única adquisición del interferograma cada vez que el programa se ejecute.

Dados estos requisitos, existe un VI dentro de los drivers proporcionados por CleverScope que se adapta mejor a la programación de nuestro instrumento virtual. Se trata del Minimun Scope.vi.

Vibrómetro de fibra óptica codificado en frecuencia

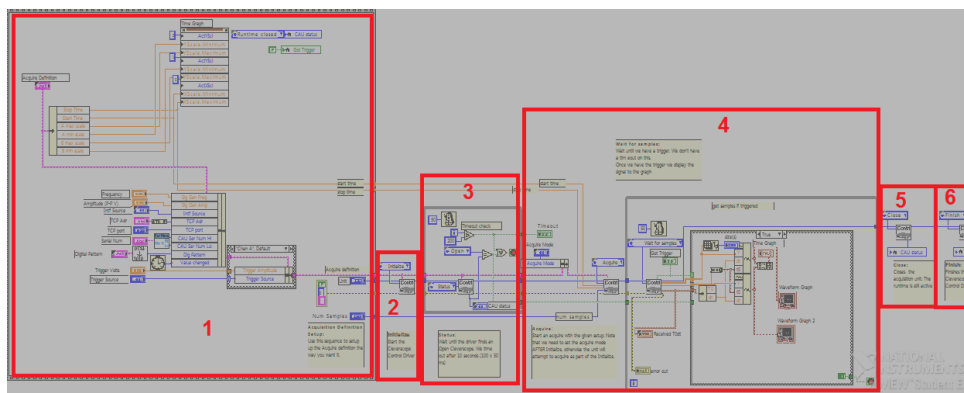


Captura de pantalla 10. Panel frontal Minimum Scope.vi.

Este instrumento virtual tomará tantas muestras como se le indique en el controlador numérico Num Samples. Para determinar el tiempo que durará el muestreo será necesario modificar los parámetros Start Time y Stop Time. Con estos dos parámetros determinaremos la frecuencia de muestreo:

$$F = \frac{\text{Num Samples}}{\text{Stop Time} - \text{Start Time}}$$

Así pues, gracias al VI Minimum Scope.vi podemos adquirir una señal de una duración y frecuencia de muestreo determinadas por nosotros mismos. El diagrama de bloques de Minimum Scope.vi se corresponde con la siguiente captura de pantalla:



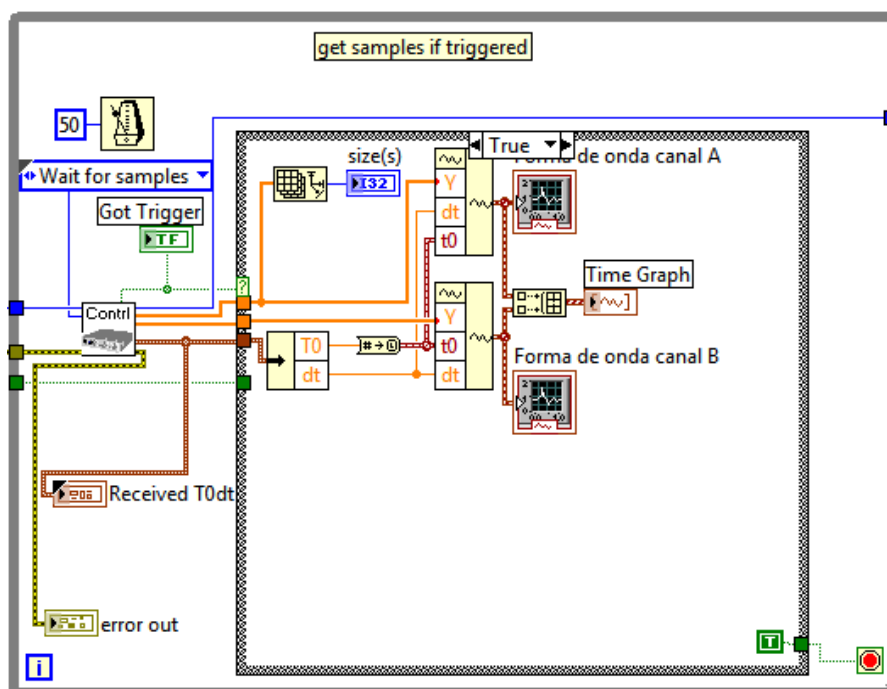
Captura de pantalla 11. Diagrama de bloques completo Minimum Scope.vi.

Se trata de una programación secuencial en el diagrama de bloques que sigue los siguientes pasos:

1. Definición de los parámetros de adquisición. Dentro de este bloque determinaremos las constantes de la adquisición (número de muestras, tiempo de adquisición, ganancia de las escalas, puertos de comunicación USB etc.)
2. Inicialización. Se inicia el driver de control de Cleverscope.
3. Estado. Espera a que el driver encuentre el módulo de Cleverscope. Si no lo encuentra cierra el programa pasados 10 segundos.
4. Adquisición. Comienza la adquisición con los parámetros definidos en el apartado 1. En este momento el instrumento virtual espera hasta que recibe la señal del disparador para tomar una muestra. Una vez tomadas todas las muestras pasamos al siguiente paso.
5. Cerrar. El VI acaba con la adquisición de datos.
6. Finalización. El instrumento virtual finaliza la ejecución del driver de control de Cleverscope.

Los datos que queremos obtener para trabajar con ellos se obtienen en el apartado 4. Se trata de un tipo de dato Forma de Onda. Este tipo de dato es un array que contiene los valores tomados y el momento en el que se tomaron. Una vez obtenidos los datos se procederá a su análisis y demodulación.

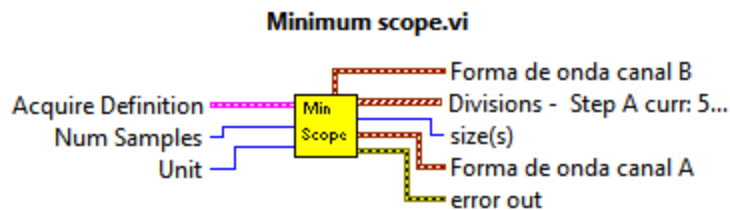
Sin embargo, este proceso requiere un diagrama de bloques amplio, por lo que no es posible realizarlo en el mismo VI que la adquisición de datos. Por esta razón es necesario hacer del Minimun Scope.vi un SubVI, un instrumento virtual dentro de nuestro VI encargado de la captura de las formas de onda.



Captura de pantalla 12. Diagrama de bloques. Etapa 4. Adquisición Minimun Scope.vi.

El requisito para crear el SubVI es colocar en el Front Panel los terminales que queremos obtener. En nuestro caso necesitamos obtener las formas de onda del canal A y B, el número de muestras (size) y si se ha producido algún error (error out).

Tras la realización de este paso, obtendremos un bloque encargado de la adquisición de las formas de onda mediante el módulo CS328A.



Captura de pantalla 13. Bloque. Minimun Scope.vi.

Este bloque toma como entradas los parámetros de adquisición, el número de muestras y a la salida ofrece las formas de onda de los canales A y B (Forma de onda canal B, Forma de onda canal A), un array para la visualización de ambos canales juntos (Divisions – Step A curr: 5...), el número de muestras tomadas (size(s)) y si existe algún error (error out).

A partir de este momento podemos crear un instrumento virtual con la posibilidad de muestrear una señal mediante el módulo CS328A para su posterior análisis. Este análisis se corresponde con la demodulación del interferograma, que será explicado en el Capítulo 4.

Capítulo 4. Demodulación del interferograma mediante LabVIEW.

Tras la adquisición del interferograma podemos realizar la demodulación de este mediante la herramienta LabVIEW para obtener los parámetros característicos de la vibración. El interferograma contiene en su forma de onda información suficiente para obtener la amplitud y frecuencia fundamentales de la vibración. Es preciso analizar una vez más la forma de onda del interferograma para poder diseñar el algoritmo de demodulación.

La señal que contiene la información necesaria para obtener la frecuencia y amplitud fundamentales de la vibración es el interferograma. La generación de esta señal se explico en el Capítulo 2. La forma de onda típica del interferograma se puede apreciar en la Simulación 8 y en las Capturas de Pantalla anteriores.

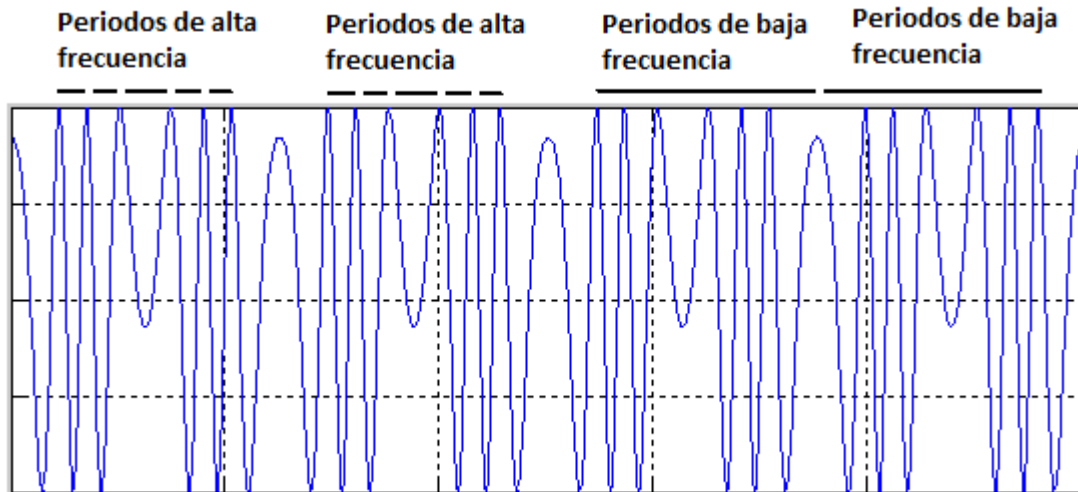


Ilustración 12. Interferograma.

En un interferograma típico podemos observar como la señal es periódica. El periodo de repetición del interferograma coincide con lo que se ha denominado periodo de baja frecuencia en la Ilustración 12. Este periodo de baja frecuencia coincide con la mitad del periodo de vibración aplicado a la fibra óptica. Por tanto, calculando mediante herramientas de análisis de señal el periodo de baja frecuencia obtendremos la frecuencia de la vibración producida sobre la fibra óptica. [9]

Tal y como se explico en el segundo capítulo, cada vez que las ondas de luz coherente se superponen en el interferómetro se producirá un máximo en la intensidad, y cada vez que se anulan se producirá un mínimo. Así pues, el número de picos que contiene cada periodo de frecuencia baja indica el número de veces que las dos ondas sinusoidales se han superpuesto. Si la vibración es sinusoidal, según lo definido en el Capítulo 2.2.1, cada uno de los picos contenidos indica el número de longitudes de onda que se ha desplazado una señal respecto a la otra. Por lo tanto la amplitud de la vibración (o el desfase producido entre las dos señales) se obtendrá de contar el número de picos contenidos en cada una de los periodos de baja frecuencia.

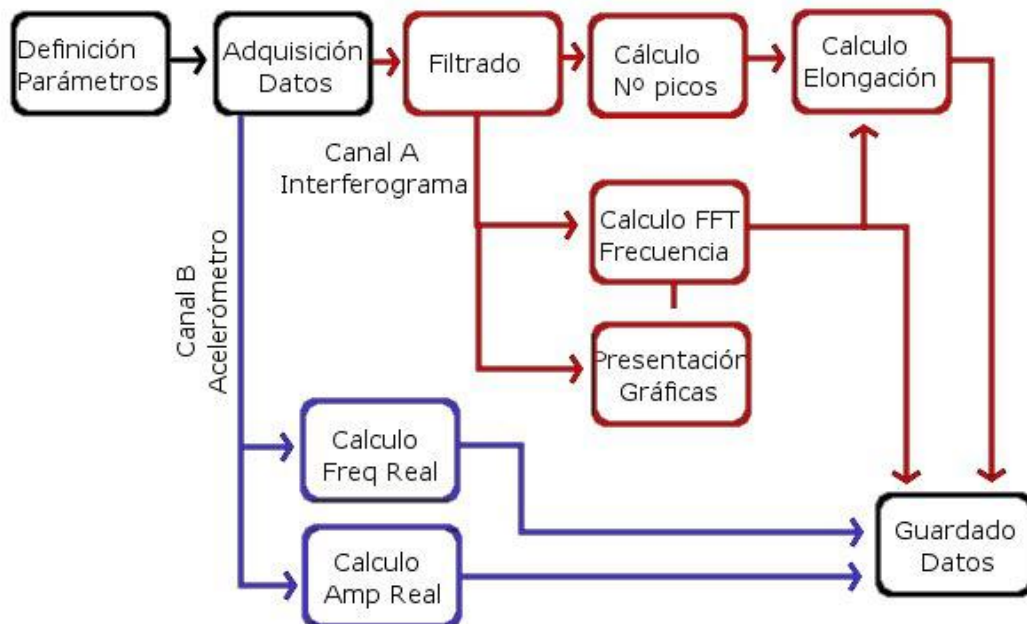
Por tanto, los objetivos del VI diseñado para la demodulación han de ser calcular el tiempo entre periodos de baja frecuencia y el número de picos que hay en cada uno de ellos. Obteniendo estas dos variables será posible cumplir el objetivo principal del proyecto: deducir la amplitud y la frecuencia de la vibración.

Además de realizar la demodulación del interferograma, el VI desarrollado ha de ser capaz de interpretar la señal proveniente del acelerómetro, para así poder calibrar el vibrómetro basado en fibra óptica.

4.1. Esquema básico del VI de demodulación y almacenamiento de datos

El instrumento virtual desarrollado ha de analizar los dos canales adquiridos por el módulo de adquisición CS328A: el interferograma y la señal proveniente del acelerómetro y su acondicionador. Esto es así pues necesitamos conocer la vibración real producida sobre la fibra óptica. Así podremos comparar la vibración calculada mediante el conjunto láser-interferómetro-demodulador con la vibración real aplicada a la fibra óptica.

Por tanto el VI ha de analizar los dos canales al mismo tiempo. El esquema básico del VI desarrollado es el mostrado en el Esquema 4.

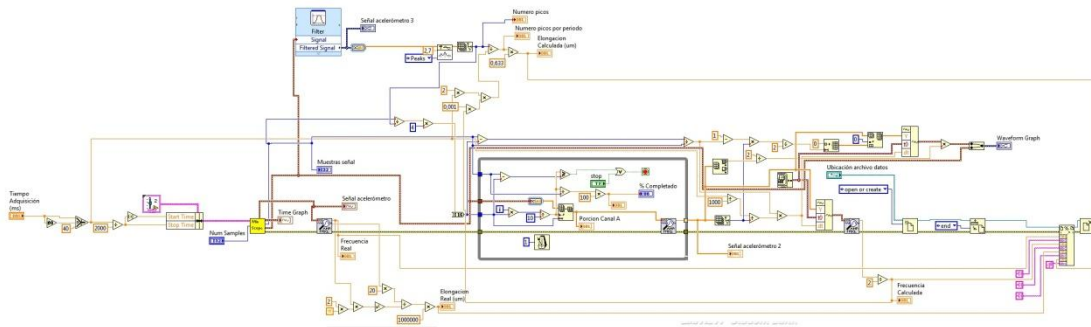


Esquema 4. Diagrama funcional VI.

En rojo se muestra el algoritmo diseñado para el cálculo de la frecuencia y amplitud de la vibración. En morado se muestra el cálculo de la frecuencia y amplitud real a partir de la señal del acelerómetro. Todos los datos son guardados posteriormente para su análisis

El diagrama de bloques completo del VI desarrollado es el siguiente:

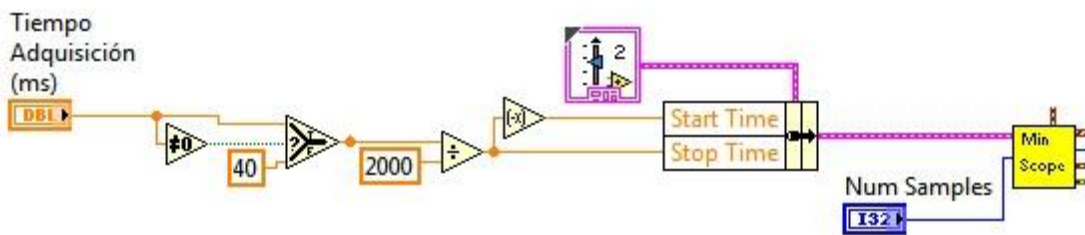
Vibrómetro de fibra óptica codificado en frecuencia



Captura de pantalla 14. Diagrama bloques completo.

El diagrama de bloques del VI es complejo y requiere un análisis detallado por partes de este. Por esa razón el VI estará dividido en cuatro secciones: definición de parámetros y adquisición de datos, algoritmo de demodulación del interferograma, adquisición de parámetros del acelerómetro y almacenamiento de datos y flujo de errores.

Antes de realizar la adquisición de datos mediante el VI proporcionado por CleverScope Minimun Scope.vi es preciso saber algunos parámetros para ajustar la adquisición a los valores nominales de una vibración. Para este proyecto hemos establecido una vibración nominal de 100 Hz. Analizar un solo periodo de vibración puede inducir a fallos, por lo que es recomendable adquirir varios periodos en una misma ejecución. Este número de periodos lo podemos controlar mediante la variable tiempo de adquisición.



Captura de pantalla 15. Diagrama de bloques. Definición de parámetros y adquisición de datos.

El código anterior establece un tiempo de adquisición de 40 ms en caso de introducir 0 ms, ya que esto provocaría un error. Posteriormente este tiempo se divide entre $2 \cdot 1000$ para ajustar las unidades a milisegundos y realizar un tiempo de adquisición simétrico. Por último debemos establecer el número de muestras que deseamos tomar. Con estos datos de entrada, el SubVI Min Scope.vi proporcionará en el tiempo de ejecución dos arrays de Formas de Onda cuyo número de muestras y tiempo de adquisición quedan determinadas por el usuario.

4.2. Algoritmo de demodulación del interferograma

Una vez obtenido el array de Formas de Onda del Canal A, el instrumento virtual realiza el algoritmo de demodulación del interferograma. Antes de realizar el análisis es conveniente efectuar un filtrado de la señal. Para la señal típica que obtendremos en el Canal A, se ha determinado un filtrado con las siguientes especificaciones:

- Tipo de filtro. Paso Bajo.
- Frecuencia de corte. 20000 Hz.
- Topología. Butterworth.
- Orden del filtro. 3.

Gracias a este filtrado podemos eliminar el ruido en la señal sin perder información del interferograma. Tras el filtrado podemos diseñar el algoritmo para obtener la frecuencia y amplitud de la vibración, información contenida en el interferograma.

4.4.1 Cálculo de la frecuencia de vibración

Como se explicó al comienzo de este capítulo, la vibración real aplicada sobre la fibra óptica coincide con el periodo de baja frecuencia (Ilustración 12). Es por tanto objetivo el obtener el valor de ese periodo de baja frecuencia. Una manera de alcanzar este objetivo es contar los picos y los valles y obteniendo la posición de aquellos que se alejen de la media y el intervalo de tiempo entre ellos, calcular la frecuencia de vibración. Este método sin embargo presenta el siguiente problema: en caso de que los picos y valles que definen el periodo de baja frecuencia coincida con los picos y valles de alta frecuencia, el algoritmo dará resultados erróneos. Además este método es muy susceptible al ruido, pese al filtrado.

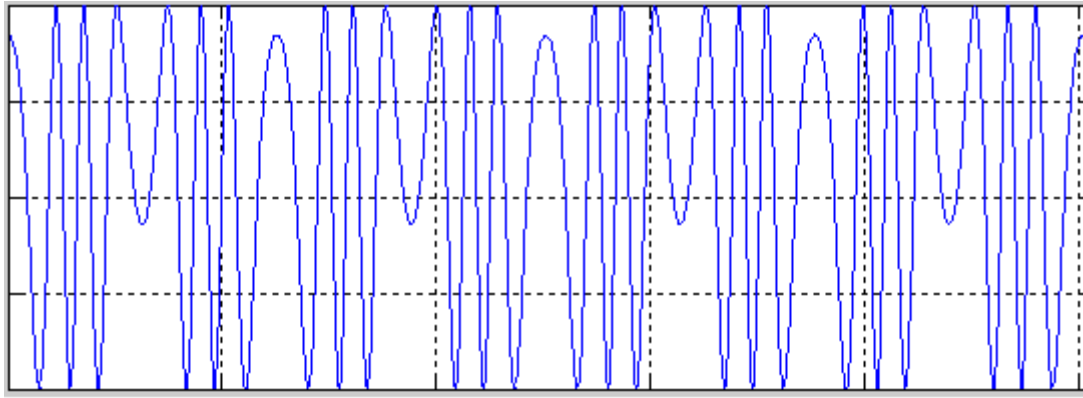
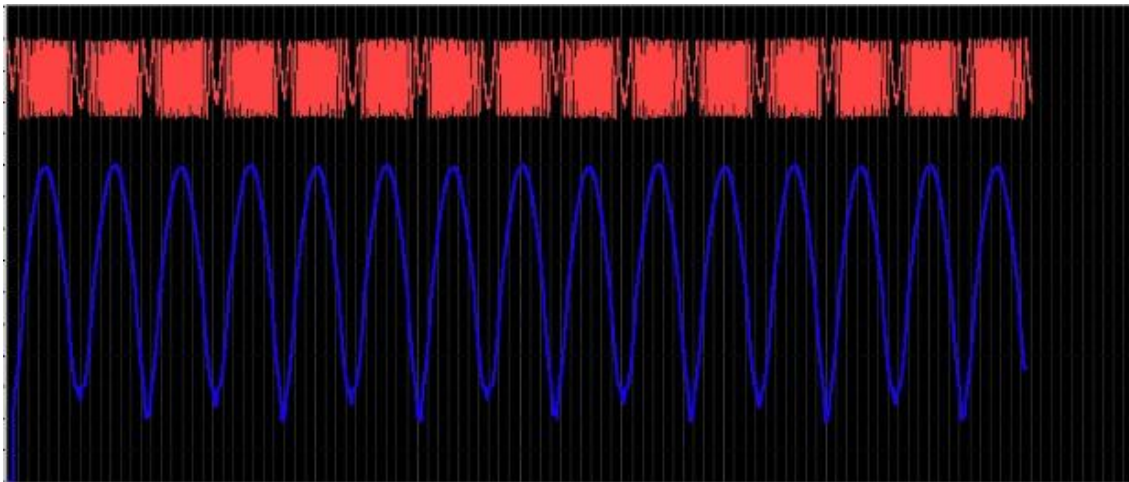


Ilustración 13. Interferograma 2.

Es por tanto necesario desarrollar un método que calcule el periodo de baja frecuencia sin recurrir al método de calcular la posición de los picos y valles.

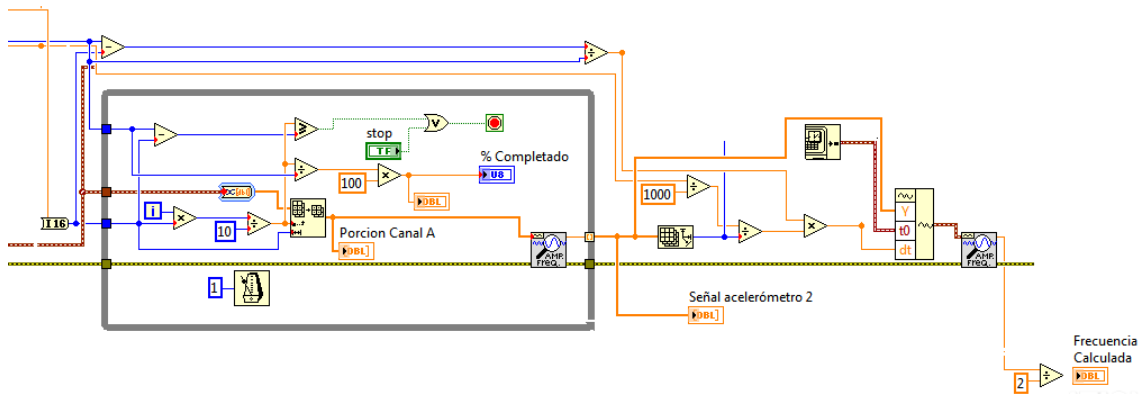
Además de los picos y valles a diferente nivel, el periodo de baja frecuencia se puede observar midiendo la distancia entre unas rampas de subida y bajada y otras. En cierto modo es similar a una modulación FM.

Una solución para calcular el periodo fundamental es construir una nueva señal con la que sea más fácil buscarlo. Si buscamos el tono fundamental en una ventana móvil que se arrastre a lo largo de todo el interferograma, recrearemos una señal cuyo tono fundamental será justamente de doble frecuencia que la vibración producida sobre la fibra óptica.



Captura de pantalla 16. Interferograma (Rojo) y tono fundamental (Azul).

Para buscar el tono fundamental de la señal se hará uso de un bloque de LabVIEW basado en el cálculo de la FFT (Fast Fourier Transform).

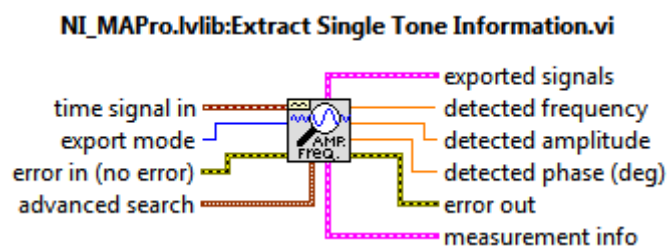


Captura de pantalla 17. Diagrama de bloques. Demodulación interferograma.

La porción del VI mostrada anteriormente es la encargada de calcular la frecuencia del periodo de baja frecuencia, y por tanto, calcular la frecuencia de la vibración. Para ello, esta porción de VI precisa las siguientes entradas:

- Señal (Waveform Data).
- Tiempo de adquisición. Tiempo total del interferograma a analizar.
- Número de muestras de la señal.
- Picos de la porción del interferograma.

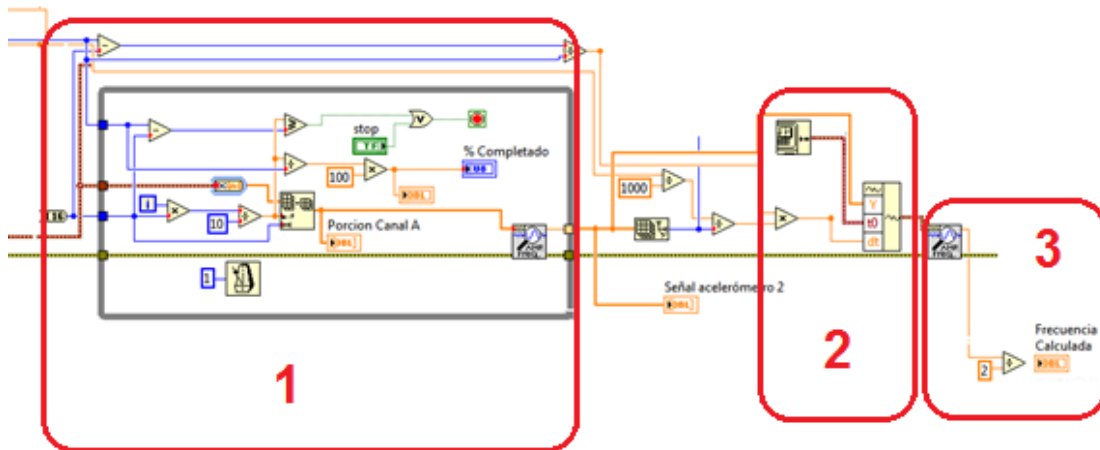
Para calcular el tamaño de la ventana móvil se toma el valor del número de picos del interferograma y el tamaño del array (número de muestras de la señal). Dentro del bucle for se crea un nuevo array que contenga únicamente 4 picos de media. Una vez obtenido esa nueva señal, la herramienta virtual Extract Single Tone Information nos proporciona la frecuencia fundamental del tono analizado y su amplitud.



Captura de pantalla 18. Bloque. Frecuencia y Amplitud del tono fundamental.

Las frecuencias calculadas se van guardando en otro array hasta que se completa el análisis del interferograma completo. Una vez completado el análisis, se obtiene una forma de onda similar a la señal Azul de la Captura de pantalla 16. A esta señal la llamaremos Señal del Tono Fundamental. Como se puede comprobar en dicha captura de pantalla, la señal azul alcanza su valor máximo cuando los periodos de alta frecuencia del interferograma se encuentran más juntos, y su valor mínimo cuando estos están más separados. Se observa claramente como la frecuencia del tono fundamental de

la señal azul coincide con la frecuencia de los periodos de baja frecuencia (Ilustración 12), luego basta con calcular la frecuencia fundamental de la señal del cálculo de la FFT del interferograma para obtener la frecuencia de la vibración. Dado que el cálculo del tono fundamental no distingue entre semiperiodos de subida y semiperiodos de bajada, el VI dará una frecuencia exactamente de valor doble a la frecuencia de vibración real. Por tanto el valor correcto de la frecuencia de vibración será la mitad de dicho valor.



Captura de pantalla 19. Diagrama de bloques. Demodulación interferograma 2.

El cálculo de la frecuencia fundamental de la porción del interferograma se realiza en la etapa 1 de la captura de pantalla anterior. En la etapa 2 se crea la señal Azul, y en la etapa 3 se calcula su frecuencia fundamental y se divide por 2 para obtener la frecuencia de la vibración real.

4.4.2. Cálculo de la elongación de la fibra óptica

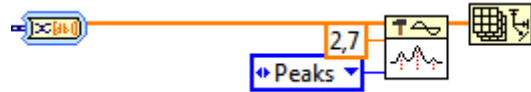
Para calcular la elongación de la fibra óptica (amplitud de la vibración) necesitamos la frecuencia de la vibración, tal y como se indica en el Esquema 4 (p. 56).

Según se explicó en el apartado 4.1, la elongación o amplitud de vibración es el número de veces que la señal óptica estática se desfasa con la señal dinámica. Por tanto es preciso contar el número de picos que contiene cada periodo de baja frecuencia. Conociendo el número de picos y la longitud de onda del láser utilizado podemos calcular la elongación aproximada que se ha producido sobre la fibra óptica.

El algoritmo que seguirá el instrumento virtual para calcular la elongación de la fibra óptica será el siguiente:

1. Calcular el número de picos.
2. Calcular el número de periodos.
3. Calcular el número de picos/periodo.
4. Calcular la elongación conociendo la longitud de onda del láser.

Para calcular el número de picos haremos uso del bloque Peak Detector.vi. Este bloque necesita además del array de datos (la señal) un nivel de disparo (threshold) sobre el que descartar los picos muy bajos.



Captura de pantalla 20. Bloque. Detector de Picos.

Ya que el nivel máximo del interferograma oscila entre 2.7 y 2.8 V (Capturas de pantalla 1 y 2), estableceremos el nivel de threshold en 2.7 V. Una vez obtenida la localización de los picos, basta con medir el tamaño del array para obtener el número total de picos.

El número de periodos se estima conociendo el tiempo de adquisición y la frecuencia calculada. Para obtener dicho parámetro basta con multiplicar el tiempo de adquisición por la frecuencia calculada.

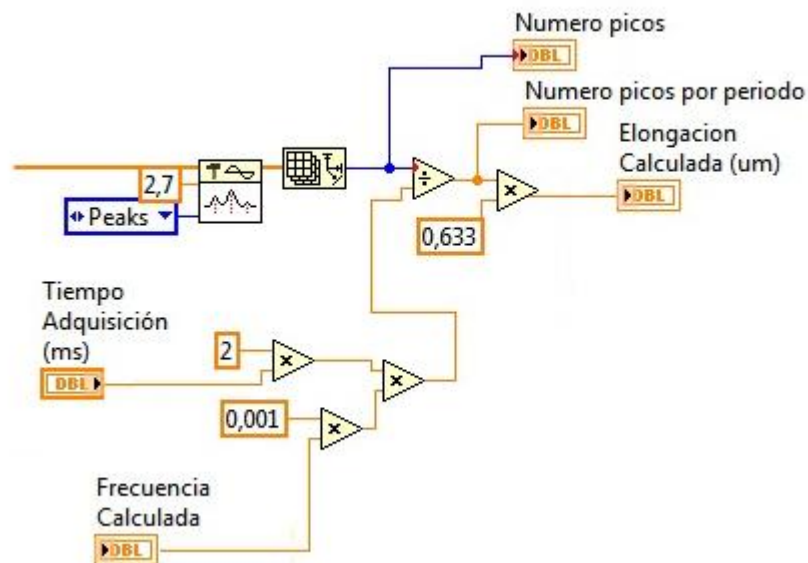
$$N^{\circ}Periodos = Tiempo\ adquisición \cdot Freq\ Vibración$$

Conociendo el número de picos existentes en cada periodo de baja frecuencia obtenemos el número de veces que se ha desfasado la señal óptica estática respecto a la dinámica.

$$Picos\ por\ Periodo = \frac{N^{\circ} Picos}{N^{\circ} Periodos} = \frac{N^{\circ} Picos}{Tiempo\ adquisición \cdot Freq\ Vibración}$$

Una vez hemos calculado el número de picos que hay en cada periodo de baja frecuencia conocemos el número de veces que se ha desfasado una señal óptica respecto a la otra. La elongación total será por lo tanto este número multiplicado por la longitud de onda utilizada (en nuestro caso 633 nm).

$$\Delta L = \frac{N^{\circ} Picos}{Tiempo\ adquisición \cdot Freq\ Vibración} \cdot 633\ nm$$



Captura de pantalla 21. Diagrama de bloques. Cálculo de la elongación.

4.3. Adquisición de parámetros del acelerómetro.

Para poder calibrar el sistema de instrumentación utilizado es necesario conocer la vibración real de la fibra óptica. Para conseguir este propósito se ha colocado un acelerómetro junto con la fibra óptica. Utilizaremos el mismo VI diseñado para la demodulación del interferograma para medir la señal proporcionada por el acelerómetro. Esta señal debe incluir tanto la frecuencia de la vibración como la elongación producida.



Ilustración 14. Acondicionador del acelerómetro.

La señal proveniente del acelerómetro depende de sus características. Para estandarizar esta señal es necesario utilizar un acondicionador del acelerómetro.

Se trata de un dispositivo que se encarga de acondicionar la señal eléctrica del acelerómetro. La salida del instrumento será otra señal eléctrica. El acondicionamiento resulta necesario ya que la vibración a la que está sometido el acelerómetro dará una amplitud de señal diferente dependiendo de la sensibilidad de este. El acondicionador se encarga de amplificar o disminuir la señal para hacerla coincidir con las unidades que deseamos.

Para conseguir el acondicionamiento de esta señal es necesario introducir como mínimo los siguientes datos:

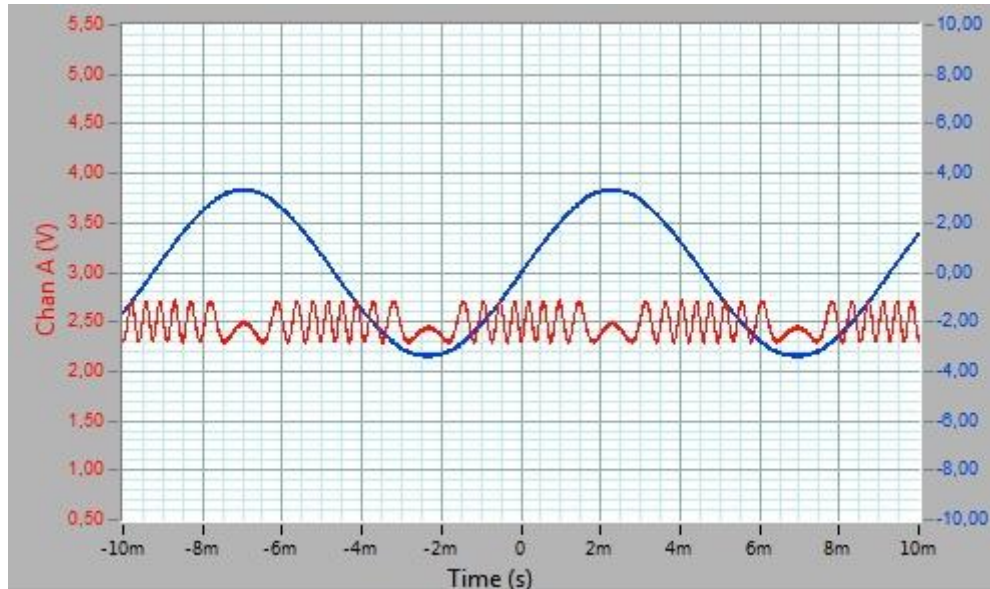
- Sensibilidad del piezoeléctrico. Introduciremos mediante los selectores del acondicionador la sensibilidad que caracteriza a nuestro acelerómetro. En este caso la sensibilidad serán 100 pC/g.
- Unidades de salida. Para trabajar con una señal en un rango cómodo podemos amplificar la señal. Para este proyecto se ha utilizado una amplificación de 100 mV/ms⁻².

Tras la elección de las unidades de salida y de la sensibilidad del acelerómetro, el sistema acelerómetro-acondicionador proporciona una señal que representa perfectamente el movimiento. La señal a la salida del acondicionador identifica la aceleración que está sufriendo el piezoeléctrico colocado en el altavoz en cada momento. Por ejemplo, en la Captura de pantalla 1, podemos ver que periódicamente el acelerómetro da un valor de 10V. Si las unidades elegidas a la salida son 100 mV/ms⁻², entonces:

$$10 \text{ V} \cdot \left(\frac{100 \text{ mV}}{\text{m} \cdot \text{s}^{-2}} \right)^{-1} = \frac{10 \text{ V}}{100 \text{ mV}} \cdot \text{m} \cdot \text{s}^{-2} = \frac{10 \text{ V}}{0.1 \text{ V}} \cdot \text{m} \cdot \text{s}^{-2} = 100 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2} = 100 \cdot \frac{\text{N}}{\text{kg}}$$

Es decir, piezoeléctrico, y por tanto el altavoz y el soporte inferior de fibra óptica, sufren en la medición realizada en la Captura de pantalla 1 (p. 34) una

aceleración máxima de 100 ms^{-2} o 100 N/kg . Dado que lo que nos interesa medir es elongaciones (o longitudes) y no aceleraciones, será necesario integrar dos veces la forma de onda dada por el acondicionador para obtener la elongación real producida en la vibración.



Captura de pantalla 22. Formas de onda Canal A y Canal B.

En la captura de pantalla anterior se aprecia en color rojo la salida del interferómetro (Canal A) y la señal proveniente del acondicionador del acelerómetro (Canal B). La frecuencia de oscilación del acelerómetro coincide con la frecuencia de la señal del acondicionador, sin embargo el valor mostrado por pantalla coincide con la aceleración que sufre el dispositivo, no con la elongación. Por lo tanto es necesario realizar una trasformada para obtener el valor de la elongación real.

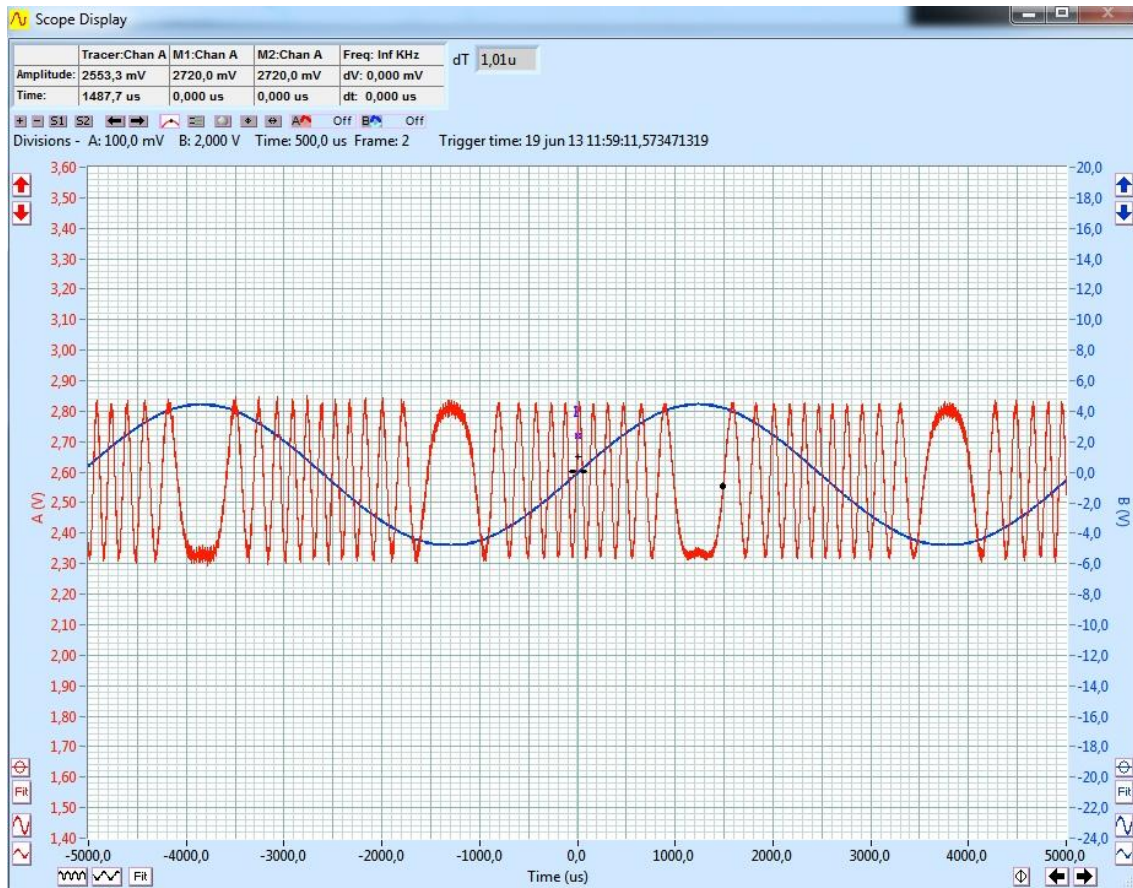
La aceleración se define como la variación de la velocidad respecto al tiempo, que a su vez es la variación de desplazamiento por unidad de tiempo.

$$a = \frac{dv}{dt} = \frac{d^2l}{dt^2}$$

Luego

$$l = \iint a(t) \cdot dt$$

Por lo tanto, para encontrar el desplazamiento real es preciso realizar la integral doble de la forma de onda de la aceleración. Para simplificar el cálculo, en lugar de realizar la integración doble punto por punto mediante la forma de onda obtenida en el Canal B, realizaremos una aproximación a partir de la forma de onda característica obtenida en el acelerómetro.



Captura de pantalla 23. Canal B muestra una forma de onda sinusoidal.

Tal y como se demostró en el Capítulo 2.2.2 (Naturaleza de la vibración, p. 19) y como se puede observar en la captura de pantalla anterior, la forma de onda obtenida del acelerómetro (Canal B) será típicamente una onda sinusoidal. Por tanto la aceleración seguirá la siguiente expresión:

$$a = A \cdot \text{sen}(w \cdot t) = A \cdot \text{sen}(2\pi f \cdot t)$$

Donde A es la amplitud máxima de la forma de onda y f la frecuencia calculada. Para obtener la elongación producida es necesario realizar la integral doble:

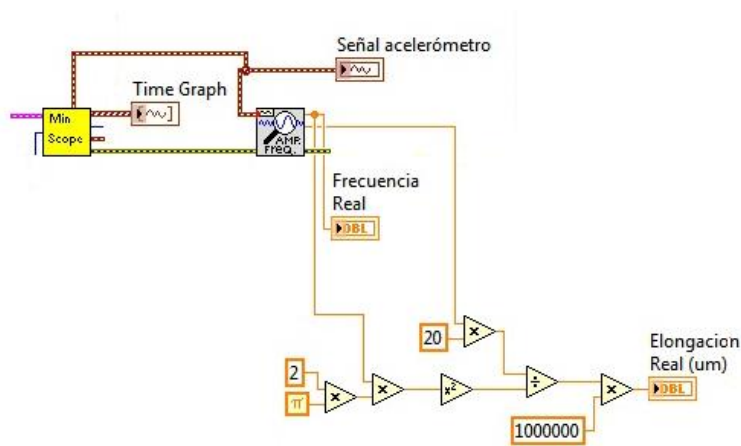
$$l = \iint A \cdot \text{sen}(w \cdot t) = \int -\frac{A}{w} \cdot \cos(w \cdot t) = -\frac{A}{w^2} \cdot \text{sen}(w \cdot t)$$

Esta expresión representa la longitud l máxima, sin embargo la elongación total es la diferencia entre la elongación máxima y mínima. Dado que la función seno es simétrica respecto al eje x , la elongación total recorrida es el doble. Además es preciso aplicar un factor $\times 10$, ya que a la salida del acondicionador del acelerómetro usamos unidades de 100 mV/ms^{-2} y es necesario trabajar con V/ms^{-2} (Capítulo 2.3.5, p. 36).

Por tanto, la expresión para calcular la elongación total producida a partir de los datos del acelerómetro es:

$$l = \frac{2 \cdot 10 \cdot A}{(2\pi \cdot f)^2}$$

Donde A es la amplitud máxima medida en el Canal B, y f es la frecuencia de la onda sinusoidal del mismo canal.



Captura de pantalla 24. Diagrama de bloques. Cálculo Frecuencia y Elongación Reales.

Se ha aplicado un factor 10^6 para medir las unidades en micras y no en metros.

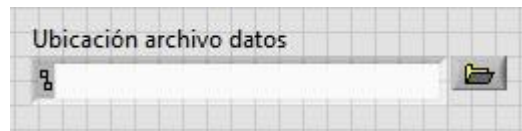
4.4. Almacenamiento de datos, presentación por pantalla y flujo de errores

El resto del código empleado en el VI desarrollado se corresponde al almacenamiento de datos, presentación de datos por pantalla y flujo de errores.

Para realizar el almacenamiento de datos se ha escogido un formato de texto. El instrumento virtual guardará en un archivo de texto los siguientes datos:

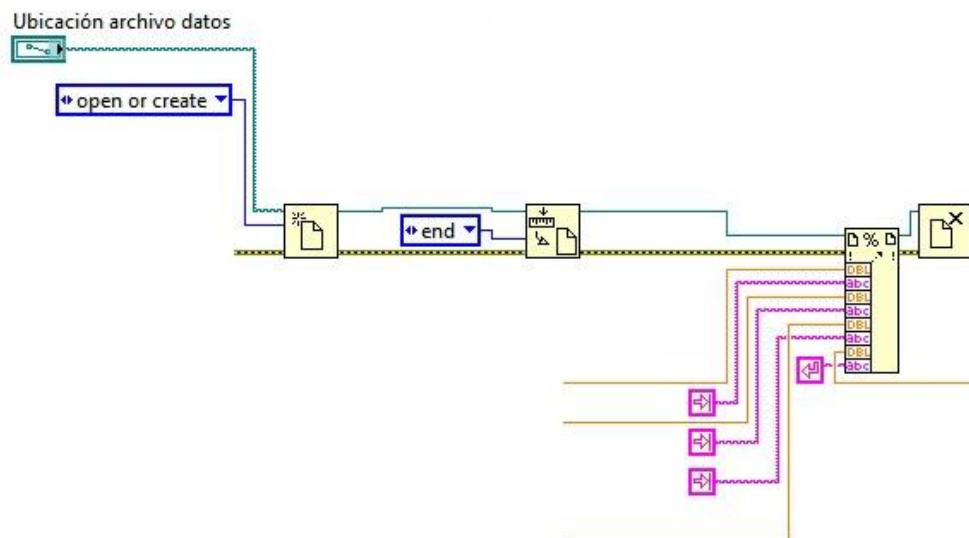
- Frecuencia Real
- Frecuencia Calculada
- Elongación Real
- Elongación Calculada

Los datos Frecuencia Real y Elongación Real son los calculados a partir de la señal del acelerómetro y los datos Frecuencia Calculada y Elongación Calculada son los parámetros demodulados del interferograma. Los datos se guardarán por el orden antes indicado. Para realizar el almacenamiento de datos es necesario que el usuario introduzca por pantalla la ubicación del archivo donde desea guardarlos.



Captura de pantalla 25. Panel Frontal. Ubicación del archivo de datos.

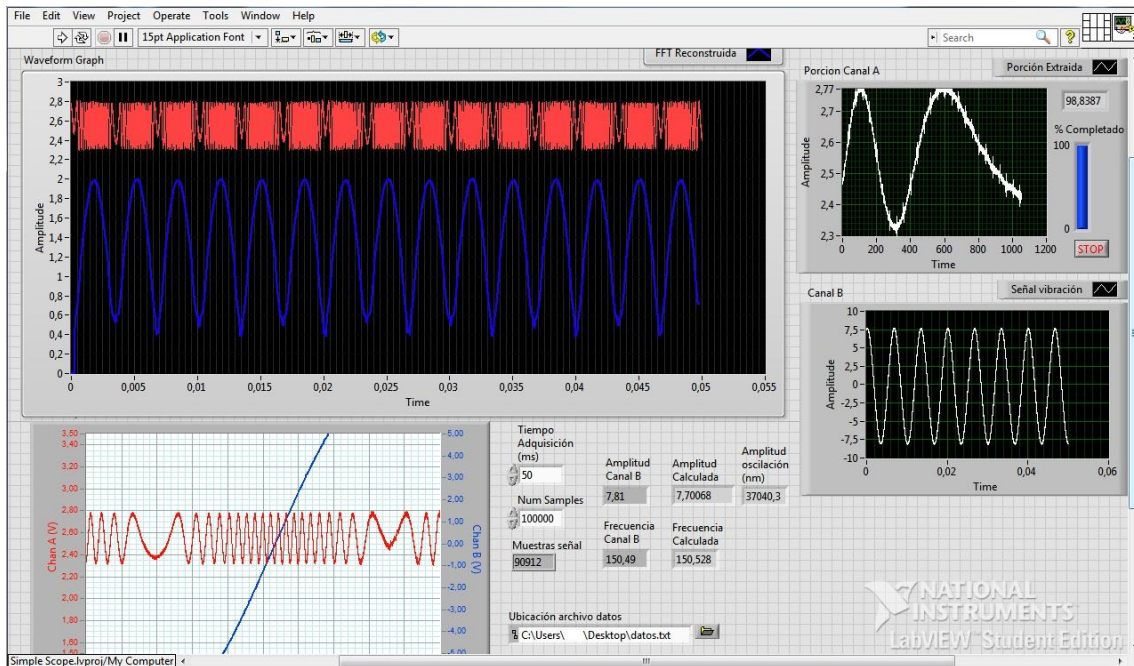
El instrumento virtual escribirá en el archivo seleccionado una nueva línea donde incluirá mediante tabulaciones los nuevos datos. De esta manera es posible abrir el archivo de texto mediante herramientas de cálculo como Microsoft Excel. El código utilizado para realizar el almacenamiento de datos es el siguiente:



Captura de pantalla 26. Diagrama de Bloques. Almacenamiento de datos.

Para presentar los datos por pantalla se diseñó el siguiente panel frontal:

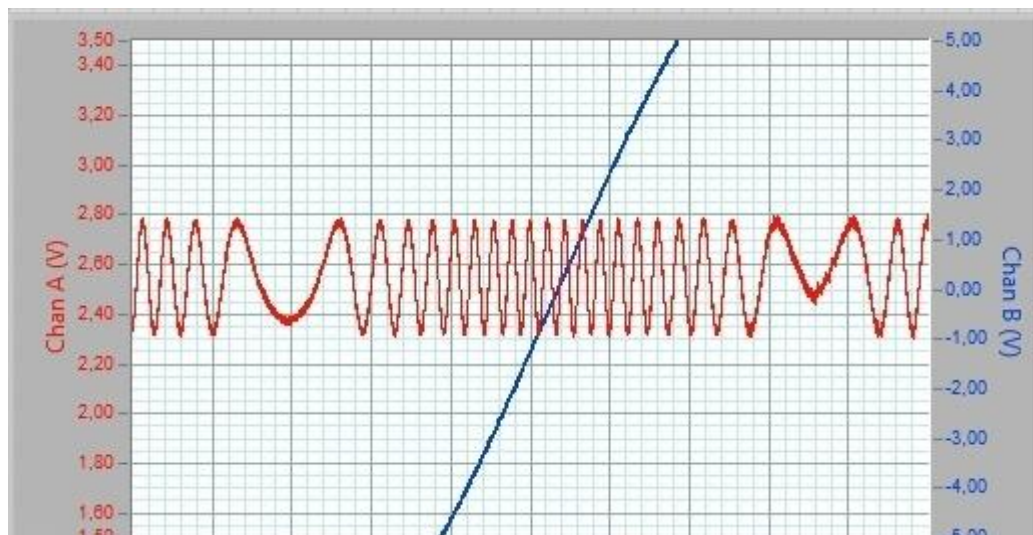
Vibrómetro de fibra óptica codificado en frecuencia



Captura de pantalla 27. Panel Frontal.

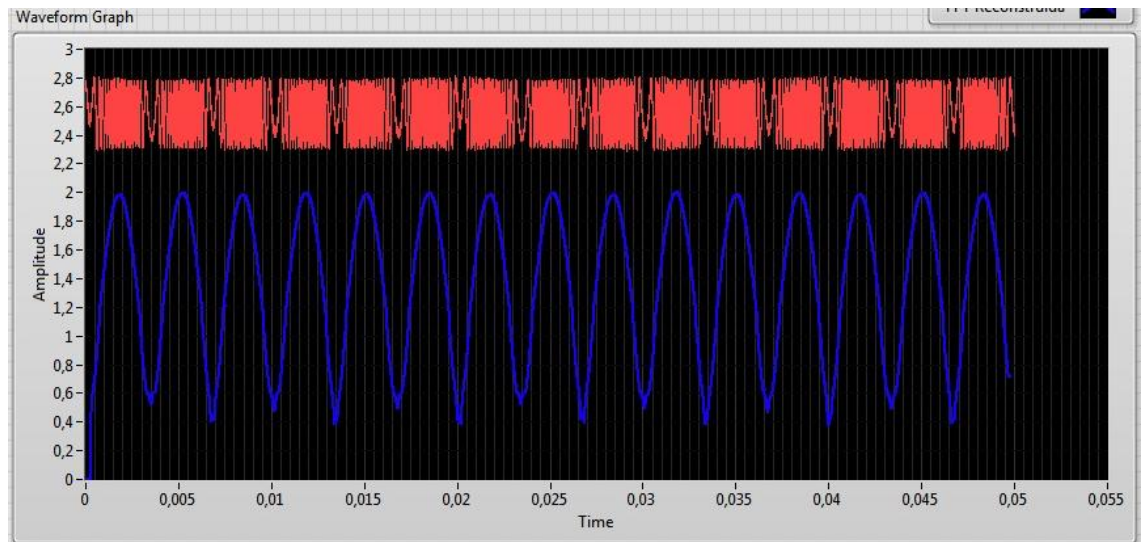
El panel frontal desarrollado cuenta con los siguientes elementos:

- Gráfico Minimum Scope. En este gráfico aparece representado lo que observaríamos al utilizar el VI Minimum Scope.

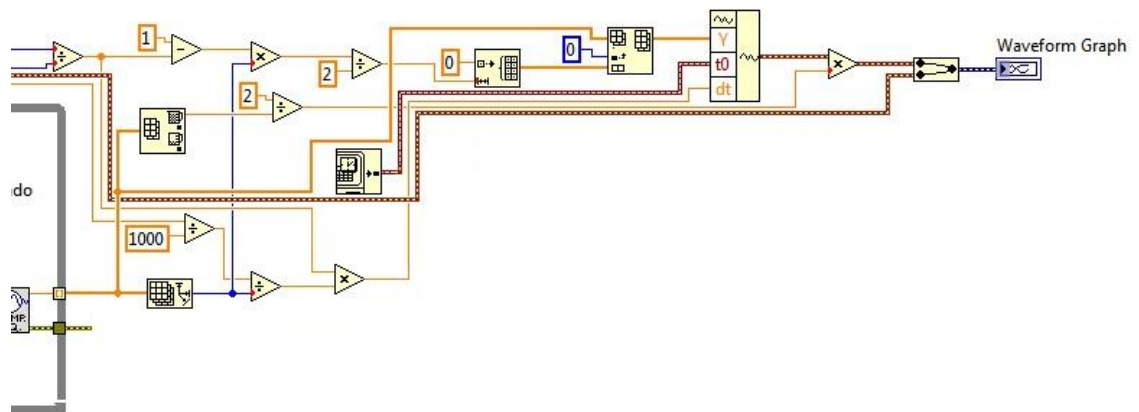


Captura de pantalla 28. Panel frontal. Gráfico Minimum Scope.vi.

- Gráfico Interferograma (Rojo) y Tono fundamental (Azul). En rojo se muestra el Canal A adquirido mediante el instrumento virtual y en Azul la reconstrucción del tono fundamental tras la demodulación.



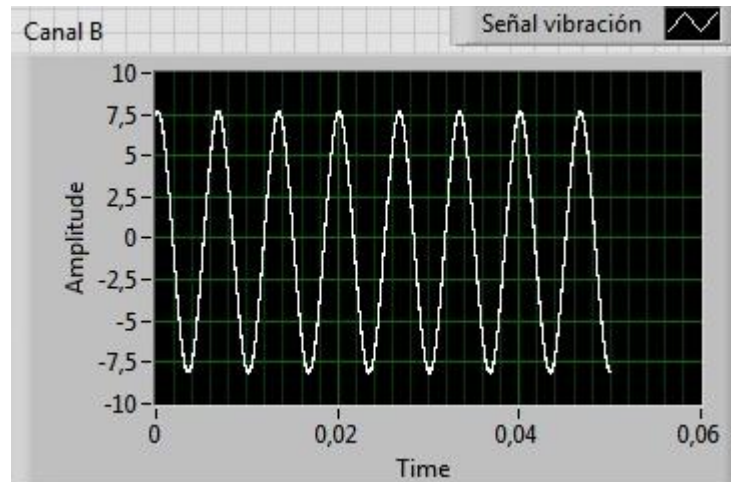
Captura de pantalla 29. Interferograma y Tono fundamental.



Captura de pantalla 30. Diagrama de bloques. Presentación por pantalla Tono fundamental.

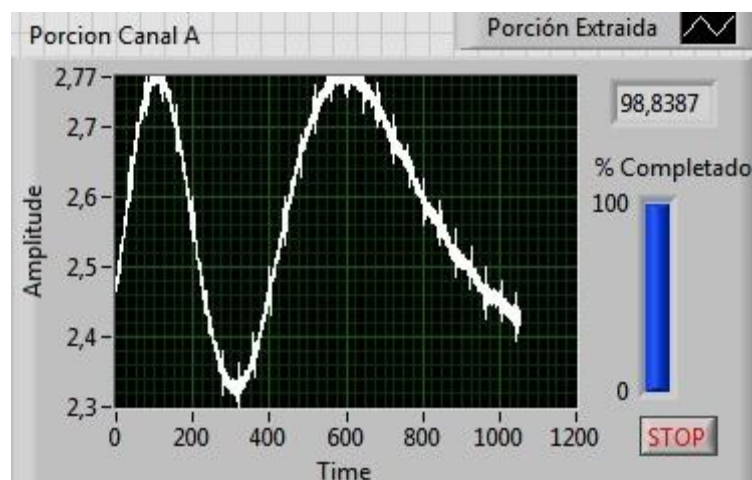
En la Captura de pantalla 30 se muestra el código utilizado para la presentación por pantalla tanto del interferograma como de la señal de Tono Fundamental extraída tras la demodulación. La señal Azul muestra valores más elevados cuanto mayor es la frecuencia del interferograma y valores más bajos cuanto menor es esta. De esta manera es fácil calcular la frecuencia del periodo de baja frecuencia.

- Canal B. En este canal se observa la señal proveniente del acondicionador del acelerómetro. De esta señal obtendremos los datos Frecuencia Real y Amplitud Real.



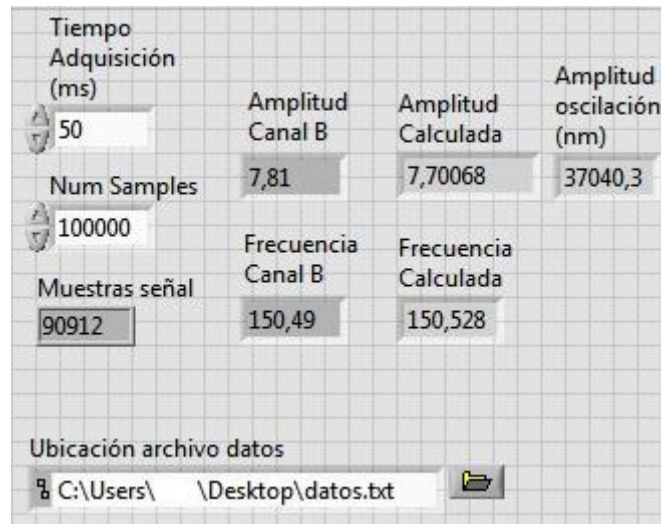
Captura de pantalla 31. Canal B.

- Porcion Canal A. En este gráfico se observa la porción del interferograma sobre la cual se está realizando el cálculo de la FFT para reconstruir el gráfico de Tono fundamental. Se incluye además una barra indicado el progreso de la demodulación.



Captura de pantalla 32. Porción del Canal A.

- Datos. Datos reales (Canal B, acelerómetro) y calculados (Canal A, interferograma). Se muestra por pantalla los datos que serán guardados en la ubicación del archivo de datos para su posterior análisis.



Captura de pantalla 33. Datos calculados y reales.

Por último, para finalizar el capítulo de programación, será preciso realizar un tratamiento de los errores que puedan surgir de nuestro instrumento virtual. Mediante este tratamiento de errores no solo evitaremos que el programa actúe de manera ineficiente, sino que además podremos controlar el flujo de ejecución del programa.

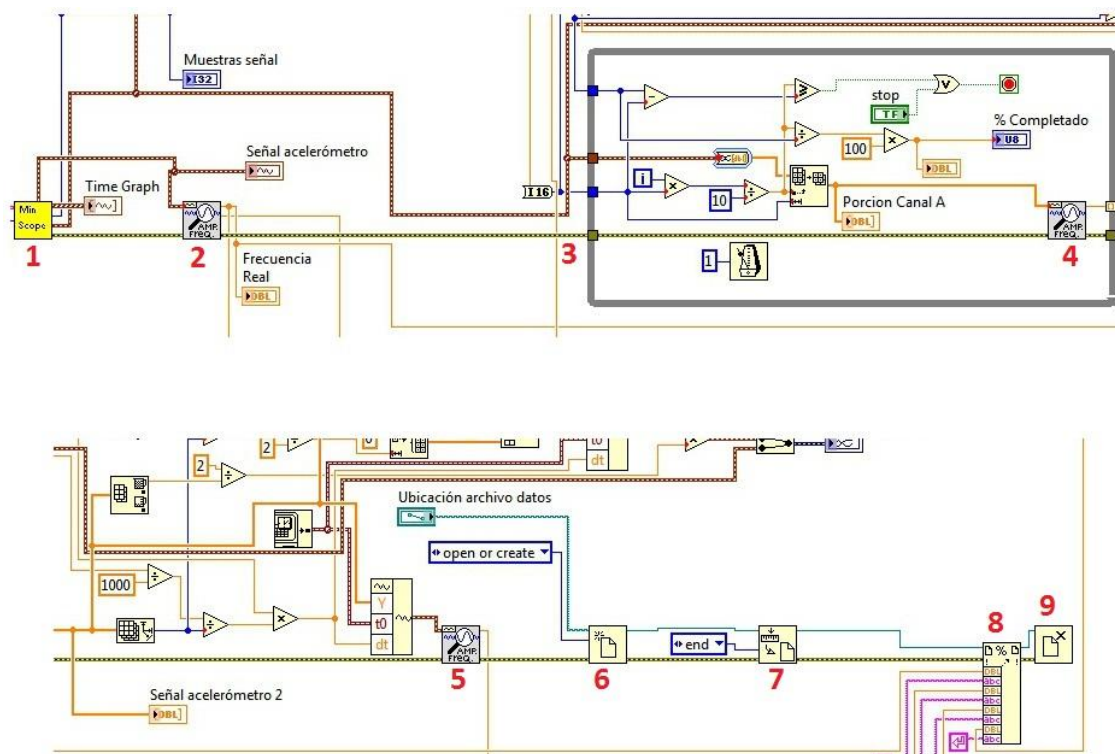


Ilustración 15. Diagrama de bloques. Flujo errores.

En la Ilustración 15 se aprecia el hilo de error. Se trata del hilo verde que comienza en el bloque Minimun Scope.vi (1). Gracias a esta programación, el instrumento virtual no comienza el análisis en busca de la información del tono fundamental (2) hasta que no se ha completado la adquisición de datos. Una vez se ha completado esta y el análisis en busca de la información del Canal B (2), el instrumento virtual procede a la elaboración de la señal del Tono Fundamental en el bucle for (3). Dentro de este bucle se realizan numerosos análisis en busca del tono fundamental (4) para producir la señal Tono Fundamental. Cuando esta señal se ha completado, el instrumento virtual procede a su análisis para calcular la frecuencia de vibración a partir del interferograma (5). Por último se realiza el almacenamiento de datos: en el primer bloque (6) se crea o abre el archivo, en el siguiente bloque se establece que comience la escritura al final de dicho archivo (7) y por último se escriben los datos en formato texto (8) y se cierra el archivo (9).

Capítulo 5. Medidas y calibración del instrumento

Una vez realizado el algoritmo de demodulación del interferograma y habiendo obtenido los datos correspondientes al conjunto de la fibra óptica, interferómetro e instrumento virtual, y los correspondientes al acelerómetro, es preciso calibrar el instrumento para completar el proyecto. Para calibrar un instrumento es necesario un instrumento patrón que nos proporcione las medidas reales a valorar. En nuestro caso, el instrumento patrón será el conjunto acelerómetro-acondicionador-instrumento virtual.

Calibrar un instrumento no significa hacer que las medidas que proporciona este coincidan con las medidas reales, sino que la diferencia entre las medidas calculadas y las reales es conocida en caso de existir.

En el Capítulo 4 se explicó la programación del instrumento virtual. Este instrumento virtual guarda los datos calculados mediante el interferograma (instrumento a calibrar) y los datos recogidos del acelerómetro (instrumento patrón) en cada ejecución del programa. Así pues, una vez recogidos los datos, podemos proceder a la calibración del instrumento para los casos de estudio propuestos. Estos casos de estudio serán medidas realizadas a 100 Hz (objetivo principal del proyecto) y múltiplos (200 Hz, 300 Hz, 500 Hz).

5.1. Experimento de calibración

Los elementos utilizados para llevar a cabo la calibración del vibrómetro se muestran en la siguiente figura:

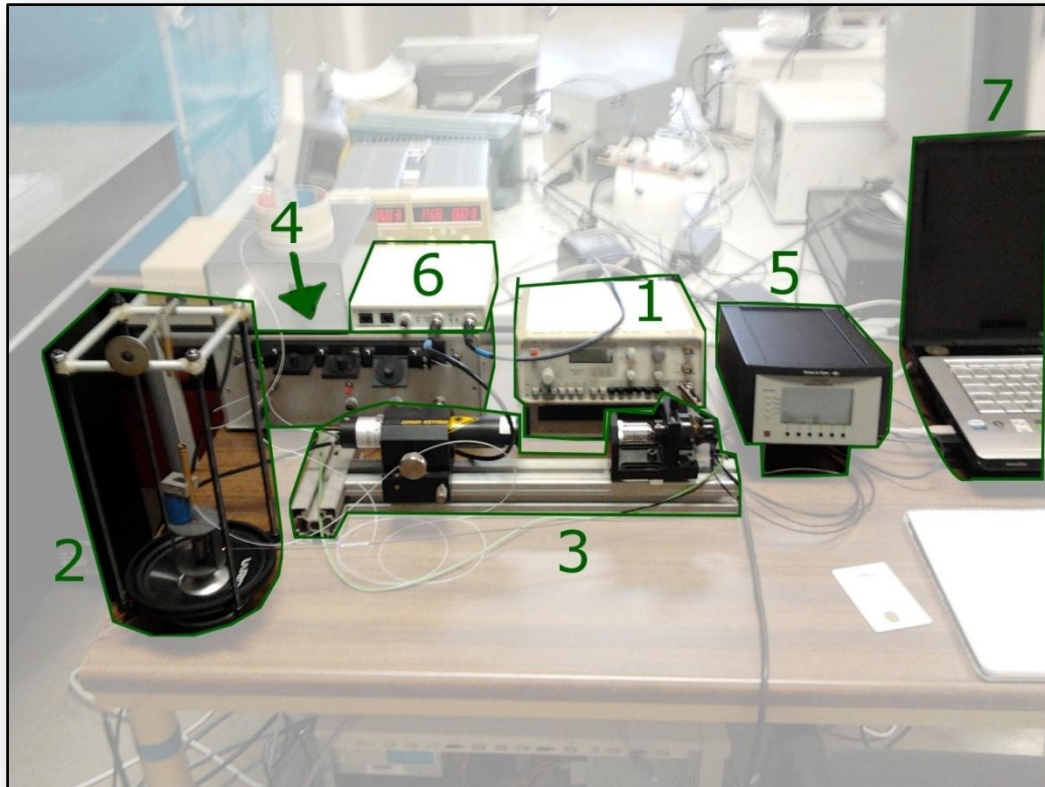


Ilustración 16. Set up completo de laboratorio.

El generador de funciones (1) provoca una tensión aplicada sobre el conjunto altavoz-acelerómetro-fibra óptica (2) provocando una elongación de la fibra. La luz coherente utilizada para generar la interferencia se produce en el láser (3). La interferencia de la luz se produce en el interferómetro (4) que además convierte la señal óptica en eléctrica. El acondicionador del acelerómetro (5) proporciona una señal calibrada de la medida del acelerómetro. Esta señal, junto con la señal proveniente del interferómetro son adquiridas por el módulo CS328A (6) y demodulados mediante el PC (7).

El bloque altavoz-acelerómetro-fibra óptica puede apreciarse completamente en la siguiente ilustración:

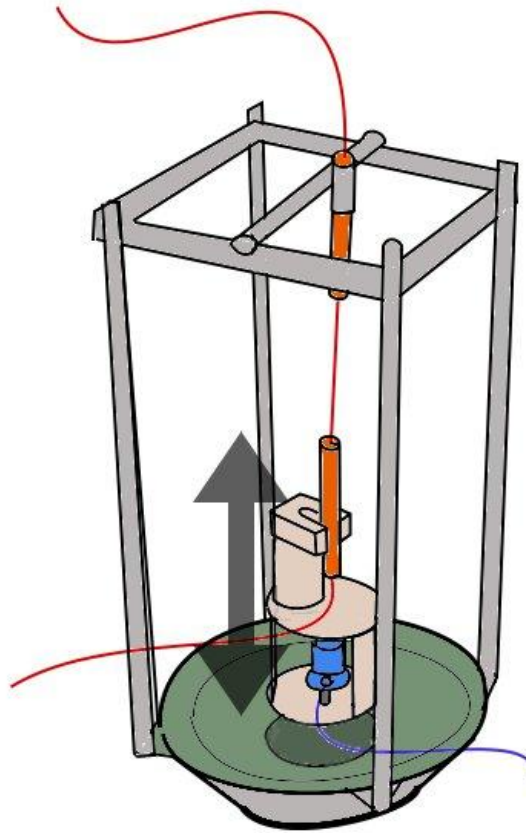


Ilustración 17. Bloque Altavoz-Acelerómetro-Extensor de fibra óptica.

Los componentes del bloque son los siguientes:

- Fibra óptica, en rojo. Es la base del proyecto. Será necesaria una fibra óptica capaz de transmitir la señal óptica de manera eficaz. Además es necesario que la fibra óptica pueda estirarse lo correspondiente a la longitud máxima establecida por la vibración.
 - Altavoz, en verde. Se trata de un altavoz de 100W. Este altavoz recibe la señal del generador de funciones y provoca una vibración de frecuencia y amplitud controladas. La vibración será sinusoidal de 100 Hz o múltiplos. Aunque el altavoz es de una potencia elevada (100W) y el generador de funciones no está diseñado para proporcionar toda esa potencia, la señal del generador provoca una vibración más que suficiente para ser medida mediante el vibrómetro estudiado. Por lo tanto, no es necesario realizar una etapa de amplificación. El altavoz tiene una sensibilidad máxima de 91 dB y un rango pasa banda de 45-22000 Hz.
- Acelerómetro, en azul. El acelerómetro 4381 es un dispositivo de la marca Bruel and Kjaer. Se basa en la tecnología de piezoeléctricos para conseguir transducir aceleraciones a señales eléctricas. La sensibilidad del acelerómetro está

Vibrómetro de fibra óptica codificado en frecuencia

expresada en términos de carga por unidad de aceleración (pC/g). Las características del acelerómetro son las siguientes:

Este dispositivo cumple todas las características necesarias para la utilización en el laboratorio. El rango de frecuencias que vamos a estudiar se encuentra dentro del rango operativo del piezoeléctrico con un gran margen. El nivel operacional que tendrá que soportar (2000 g) es mucho mayor que la aceleración que generará la vibración controlada por el generador de funciones. Además su pequeño tamaño, su alta frecuencia de resonancia y su pequeño nivel de ruido se adapta a la naturaleza de la vibración que vamos a estudiar.



Ilustración 18. Acelerómetro piezoeléctrico 4381 Bruel and Kjaer.

La salida del acelerómetro es una señal eléctrica provocada por la excitación del piezoeléctrico. Esta señal depende de la sensibilidad de cada acelerómetro por lo que será necesario acondicionarla. Esa tarea se realizará mediante el acondicionador explicado los capítulos anteriores.

El manual para el correcto uso del acelerómetro y el acondicionador se encuentra en el apartado Manuales, dentro de los Anexos.

- Soporte de fibra óptica, en naranja. Para anclar la fibra y forzar su elongación periódica son necesarios unos soportes que fijen completamente la fibra óptica. Los soportes están contruidos de metal y poseen un resorte capaz de anclar la fibra óptica a ellos sin necesidad de cortarla. Gracias a esto podremos usar una fibra óptica cuyos extremos se podrán unir al interferómetro mediante conectores FC.

De las dos fijaciones de fibra óptica, la inferior estará fija al soporte de la fibra óptica y el acelerómetro (beige), y la superior estará anclada a la estructura metálica (gris). De esta manera el soporte inferior vibrará al mismo ritmo que el acelerómetro mientras que el soporte superior estará fijo. Por lo tanto, la elongación que sufrirá la fibra óptica será la misma que la longitud medida por el acelerómetro.

- Soporte de fibra óptica y acelerómetro, en beige. Se trata de un cuerpo fabricado mediante diferentes plásticos y aluminio, el cual aloja en su interior al acelerómetro, y en su parte superior permite colocar el soporte de fibra óptica. Este cuerpo es rígido y está anclado al altavoz, por lo que vibrará con la misma frecuencia y amplitud que este.
- Estructura metálica, en gris. Mediante varillas de hierro y aluminio se ha construido una estructura para poder sujetar a cierta distancia del altavoz el soporte superior de la fibra óptica. Esta estructura está fija a la parte inferior del altavoz, por lo que la vibración de este no afecta al soporte superior de la fibra óptica, consiguiendo así que la fibra se elongue una distancia igual a la amplitud de la vibración, y a una frecuencia igual que la impuesta por el altavoz.

Las gráficas comparativas que se exponen en los siguientes análisis son el resultado de representar por un lado la amplitud medida mediante el acelerómetro y por otro lado la amplitud calculada mediante el vibrómetro y el algoritmo de demodulación.

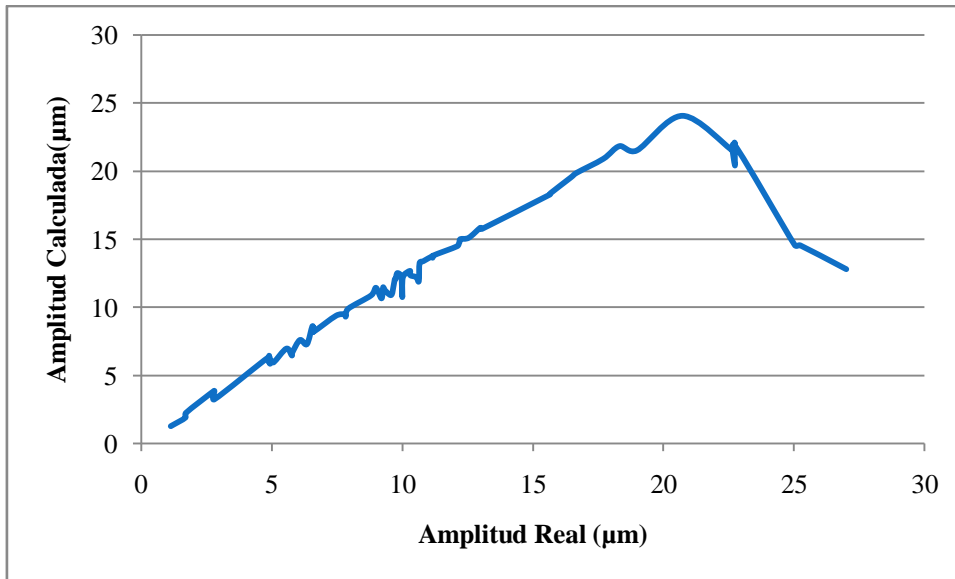
Esto significa que se va a representar por un lado la integral doble de la señal de aceleración proporcionada por el vibrómetro, que da como resultado el desplazamiento sufrido por este. Por otro lado se representa el número de picos promedio contados por el algoritmo de demodulación. Cada periodo contabilizado corresponde aproximadamente con una longitud de onda de desplazamiento [6].

5.2. Calibración a 100 Hz

Para la realización de la calibración a 100 Hz analizaremos mediante una hoja de cálculo los datos tomados en el laboratorio. Estos datos se encuentran en los anexos. Como se explicó anteriormente, el instrumento virtual desarrollado guarda en cada ejecución tanto los datos reales de la vibración (los procedentes del acelerómetro) como los datos calculados (procedentes del algoritmo de demodulación). Gracias a estos datos podemos observar el funcionamiento de nuestro sistema para medir las vibraciones.

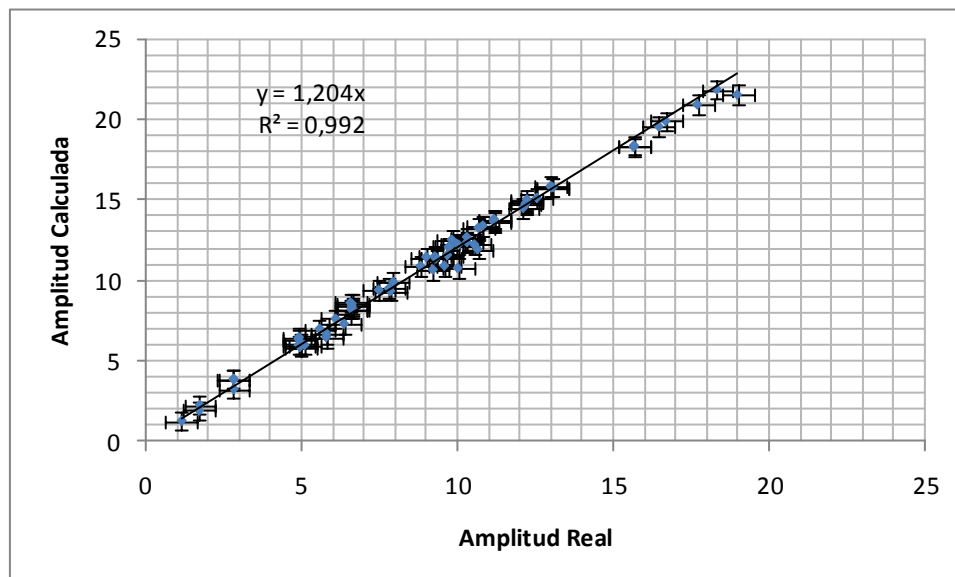
Para el caso de una vibración a 100 Hz se han tomado 73 muestras. Si representamos la amplitud calculada en función de la amplitud real obtenemos la siguiente gráfica:

Vibrómetro de fibra óptica codificado en frecuencia



Gráfica 1. Datos amplitud a 100 Hz.

En la gráfica anterior observamos un comportamiento lineal del sistema hasta los 20 µm, por lo tanto antes de realizar un análisis completo eliminaremos los datos cuya amplitud supere ese rango, quedando el número de muestras en 65. La nueva gráfica que representa la amplitud calculada en función de la amplitud real es la siguiente:



Gráfica 2. Calibración de la amplitud a 100 Hz.

Se observa ahora como el comportamiento del sistema a la hora de calcular la amplitud de la vibración es mucho más lineal.

Si ajustamos las muestras a una recta utilizando el método de mínimos cuadrados, obtenemos la siguiente ecuación:

$$y = 1.204 x \rightarrow \text{Amplitud Calculada} = 1.204 \cdot \text{Amplitud Real}$$

Luego para obtener el valor de la amplitud real a partir de nuestro algoritmo de demodulación basta aplicar un factor $1/1.204$ a la amplitud obtenida:

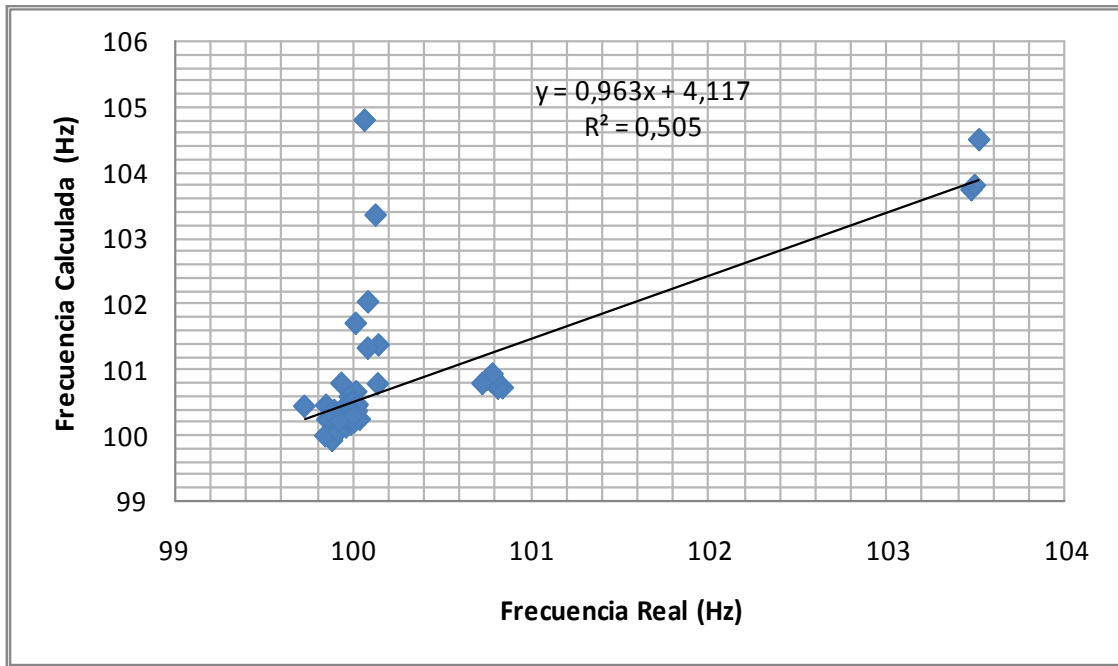
$$\text{Amplitud Real} = \frac{\text{Amplitud Calculada}}{1.204}$$

El valor de R^2 (Coeficiente de correlación) presentado en la gráfica toma un valor más cercano a 1 cuando más cerca de la línea de tendencia se sitúan los puntos, y un valor cercano a 0 cuando las muestras no se comportan de manera lineal. Con un valor de R^2 de 0.992, podemos afirmar que nuestro sistema sigue una línea de tendencia de manera muy lineal para el cálculo de la amplitud de la vibración a 100 Hz.

Las barras de error mostradas son calculadas automáticamente por la hoja de cálculo. Se trata del error estándar, y para calcularlo, Microsoft Excel utiliza el siguiente método:

ESTA OPCIÓN	USA ESTA ECUACIÓN	DONDE
Error estándar	$S.E. = \sqrt{\frac{\sum_{s=1}^m \sum_{i=1}^n y_{is}^2}{(n_y - 1)(n_y)}}$	<p>s = número de serie</p> <p>i = número de punto en la serie s</p> <p>m = número de serie para el punto y en el gráfico</p> <p>n = número de puntos en cada serie</p> <p>y_{is} = valor de datos de la serie s y del punto iésimo</p> <p>n_y = número total de los valores de datos en todas las series</p>

Para completar la calibración a 100 Hz debemos observar la relación entre los datos de la frecuencia real y la frecuencia calculada, para determinar el comportamiento del sistema a la hora de determinar esta segunda variable. En los datos incluidos en el anexo, la diferencia entre la frecuencia calculada y la frecuencia real no son muy altos. Además todos estos datos están en torno a los 100 Hz por lo que intentar representar la frecuencia calculada en función de la frecuencia real no proporcionará mucha información.



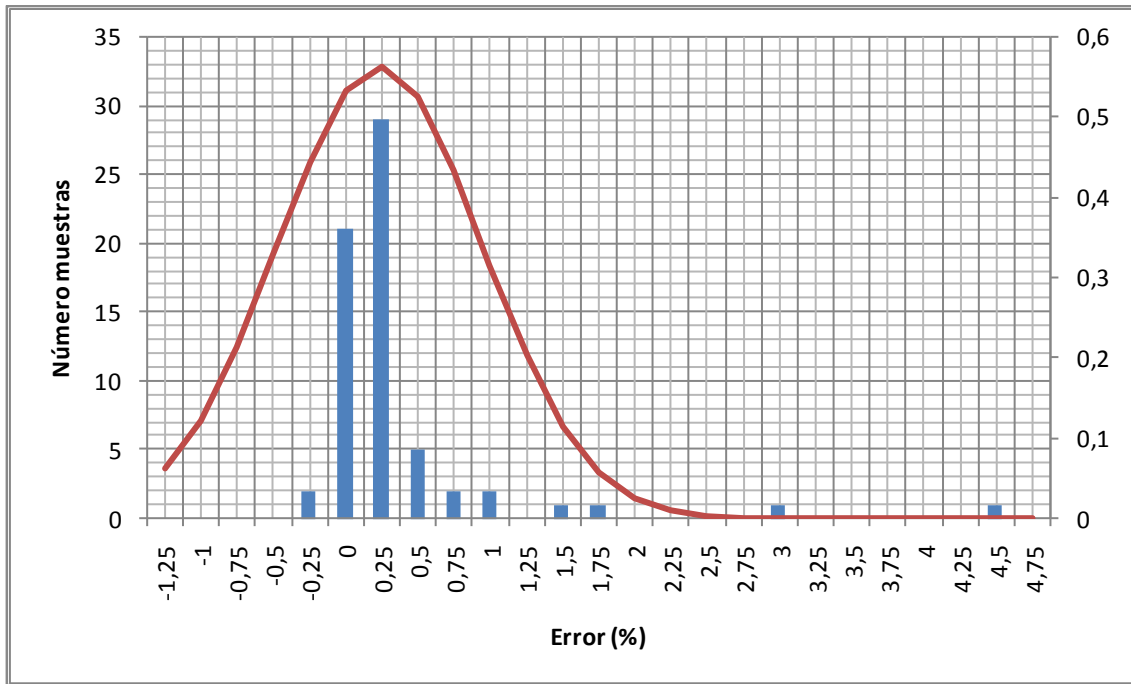
Gráfica 3. Datos frecuencia a 100 Hz.

El valor de R^2 representando la frecuencia calculada en función de la frecuencia real es muy bajo, y depende de pocos datos. En lugar de realizar este análisis para calibrar el cálculo de la frecuencia, realizaremos un histograma.

Un histograma representa la frecuencia con la que una serie de muestras aparece en un rango. Para estudiar el cálculo de la frecuencia vamos a representar en un histograma el error producido entre la frecuencia calculada y la frecuencia real:

$$error(\%) = \frac{Frecuencia\ Calculada - Frecuencia\ Real}{Frecuencia\ Calculada} \cdot 100$$

Si realizamos esta operación para las 65 muestras válidas a 100 Hz, los errores de esas muestras a la hora de calcular la frecuencia se encuentran distribuidos de la siguiente forma:



Gráfica 4. Distribución error en el cálculo de la frecuencia.

La distribución del error porcentual se aproxima a la forma de una campana de gauss. Por tanto el comportamiento del sistema queda definido si calculamos la media del error de las muestras y la desviación típica:

- Error medio (%): 0.487.
- Desviación típica: 0.708.

Una vez obtenidos estos parámetros, podemos dibujar la distribución normal (rojo) sobre la distribución de los errores (azul, Gráfica 4).

Una vez realizado este estudio podemos definir la calibración del instrumento buscando vibraciones a una frecuencia de 100 Hz.

La longitud de onda del láser utilizado en el sistema es de 633 nm, por lo tanto esa es la distancia mínima que ha de desplazarse la fibra óptica para asegurar la generación de un pico detectable mediante el algoritmo de demodulación del instrumento virtual. Es por tanto 633 nm el valor mínimo del rango y el valor de la resolución. El valor máximo del rango para un funcionamiento lineal es de 20 μm como se observa en la Gráfica 1 (p. 76).

El rango de frecuencias se estudiará en el último punto de este capítulo. La resolución de la frecuencia a 100 Hz se puede establecer a partir de la desviación típica. Dado que este valor es del 0.7 % no tiene sentido establecer resoluciones mas precisas que este valor. Ya que prácticamente todo el error se encuentra por debajo del 1%

(Gráfica 4, p. 79) podemos establecer una resolución de 1 Hz con un alto intervalo de confianza.

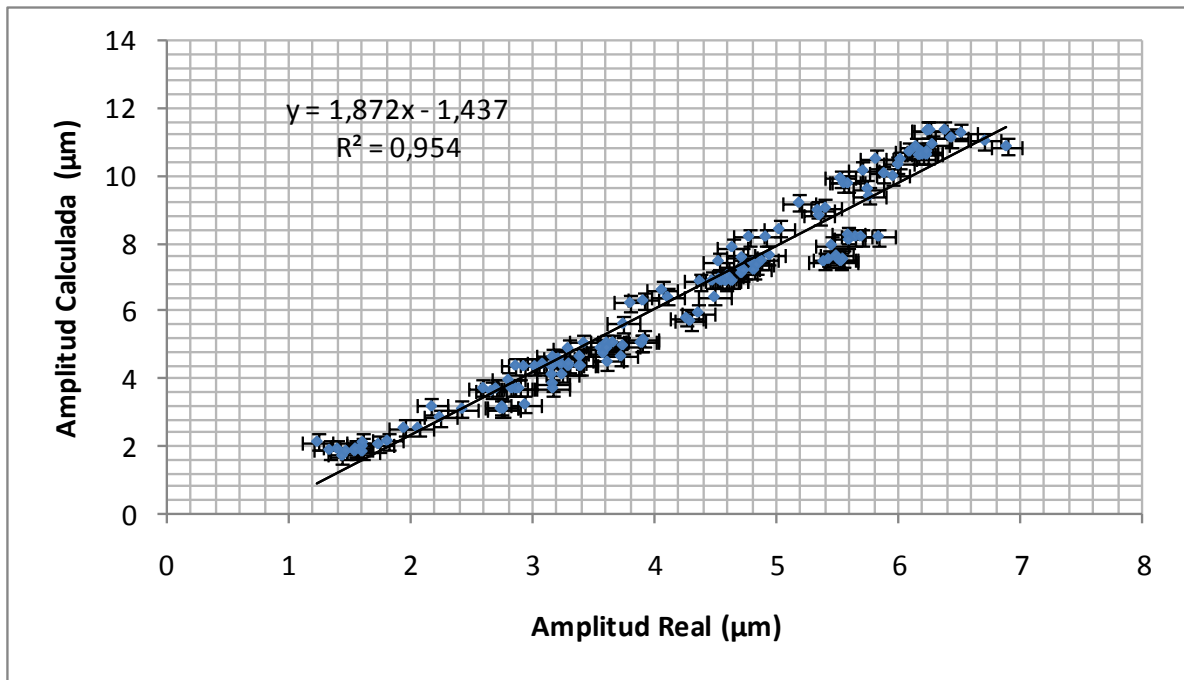
Tabla 1. Calibración a 100 Hz.

100 Hz	Amplitud	Frecuencia
Rango	0.633 μm – 20 μm	-
Resolución	0.633 μm	1 Hz

5.3. Calibración a 200 Hz

Para determinar el comportamiento del sistema analizando vibraciones a 200 Hz seguiremos los mismos pasos que los empleados en el Capítulo 5.1. Al igual que en ese apartado, los datos utilizados para la calibración a 200 Hz se encuentran en el anexo.

En esta ocasión se han tomado 134 muestras en el laboratorio. Para observar el comportamiento del sistema a la hora de calcular la amplitud de la vibración producida sobre la fibra óptica representaremos la amplitud real (calculada mediante el acelerómetro) frente a la amplitud calculada (la deducida del interferograma).



Gráfica 5. Amplitudes a 200 Hz

Los puntos calculados se ajustan a una recta con un valor alto de R^2 , sin embargo en esta ocasión la expresión que define la recta tiene un valor en la ordenada en el origen:

$$y = 1.872x - 1.437$$

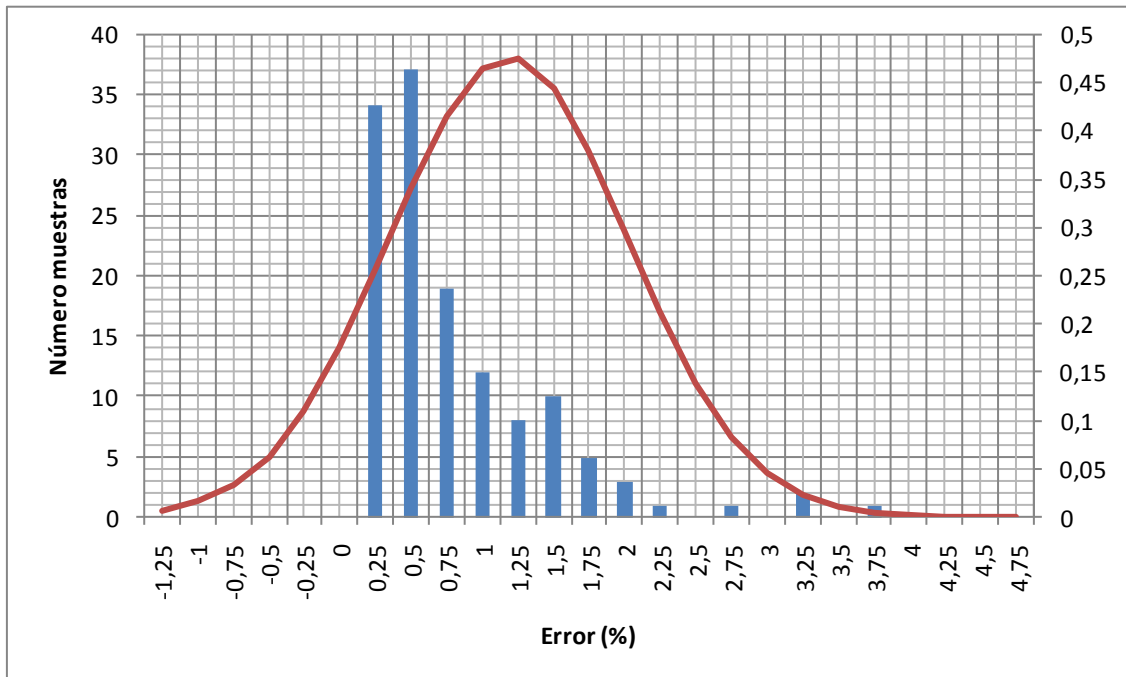
Por lo tanto a 200 Hz el sistema no aplica simplemente un factor lineal, sino que introduce un término independiente. Este hecho perjudica el análisis para amplitudes bajas. De hecho en la Gráfica 5 se aprecia como a amplitudes bajas el sistema no responde adecuadamente. Para deducir la amplitud real a partir de la calculada mediante LabVIEW es por tanto necesario calcular la inversa de la función anterior:

$$\text{Amplitud Real} = \frac{\text{Amplitud Calculada} + 1.437}{1.872} (\mu m)$$

$$\text{Amplitud Real} = \frac{\text{Amplitud calculada}}{1.872} + 0.435 (\mu m)$$

Al igual que en el apartado de 100 Hz, ya que la frecuencia a la que estamos trabajando es constante (200 Hz) realizar una aproximación por una recta resulta poco

útil. Por consiguiente elaboraremos un histograma para observar el error producido en el cálculo de la frecuencia.



Gráfica 6. Histograma del error frecuencias a 200 Hz.

- Error medio (%): 1.436
- Desviación típica: 0.838

En esta ocasión la distribución de los errores porcentuales en el cálculo de la frecuencia no se aproxima a una distribución normal. La mayor parte de los errores se sitúa entre el 0% y el 2%, por lo tanto estableceremos una resolución del 2% de la frecuencia de trabajo (4 Hz). Así nos aseguraremos que el error de prácticamente todas las frecuencias calculadas se encuentran por debajo de la resolución.

Tabla 2. Calibración a 200 Hz.

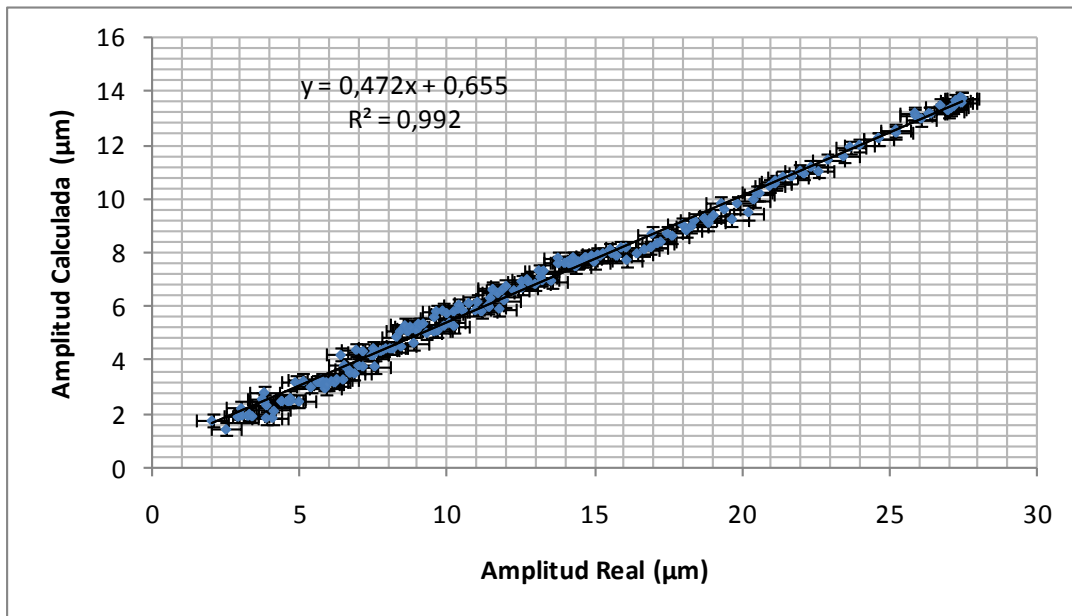
200 Hz	Amplitud	Frecuencia
Rango	1.266 μm – 8 μm	-
Resolución	0.633 μm	4 Hz

El rango a partir del cual el sistema se comporta de manera lineal se puede observar en la Gráfica 5 (p. 81). Podemos determinar que el sistema se comporta de

manera lineal desde dos veces la longitud de onda hasta las 8 micras de amplitud de la vibración. La resolución al igual que en el caso de 100 Hz es de una longitud de onda (633 nm).

5.4. Calibración a 300 Hz

Al igual que en los apartados anteriores representamos la amplitud calculada en función de la amplitud real. En este caso estudiaremos 185 muestras.



Gráfica 7. Amplitudes a 300 Hz.

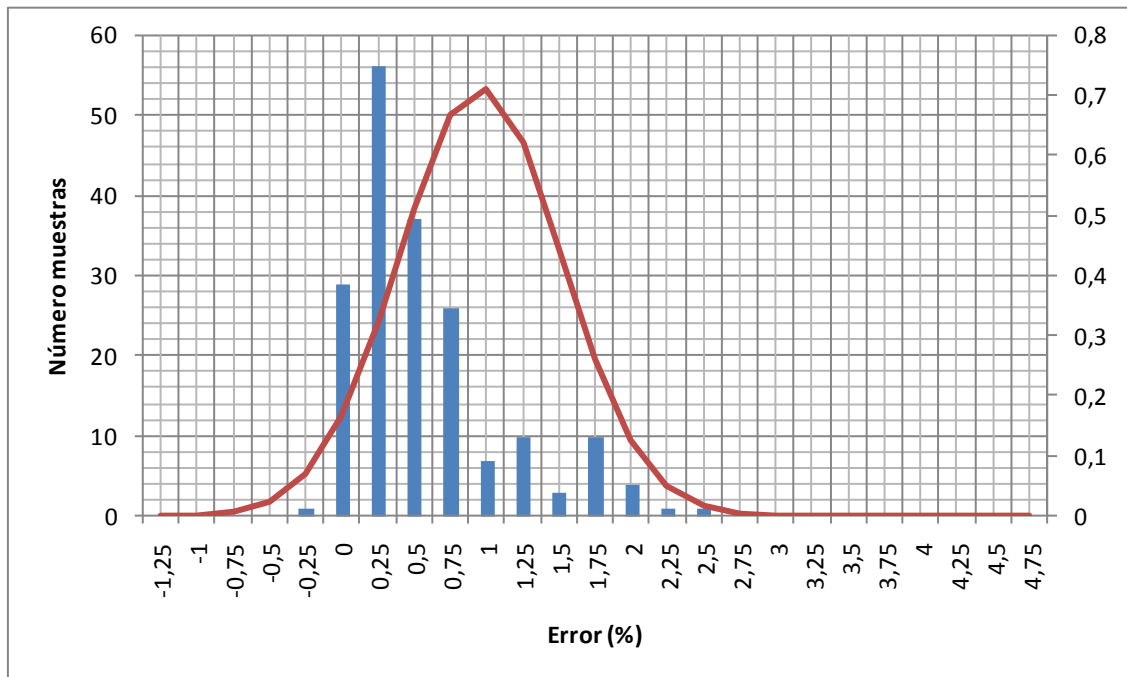
En este caso se puede apreciar como los datos se ajustan mejor a la recta (el valor de R^2 es muy cercano a 1). Sin embargo, el factor m de la recta ahora es menor que 1, al contrario que en los apartados anteriores. La expresión para deducir la amplitud real por lo tanto es la siguiente:

$$Amplitud\ Real = \frac{Amplitud\ Calculada - 0.655}{0.472}$$

$$Amplitud\ Real = 2.12 \cdot Amplitud\ Calculada - 1.39$$

Observamos como el factor de la recta depende de la frecuencia a la que estemos trabajando.

Si estudiamos la distribución de los errores obtendremos una distribución similar a la observada a 200 Hz. Una vez más la distribución dista de corresponder con una campana gaussiana. Al igual que a 200 Hz la práctica totalidad de los errores se encuentran entre el 0% y el 2%. Por tanto la resolución del sistema para el cálculo de frecuencias a 300 Hz será de 6Hz.



Gráfica 8. Histograma de error frecuencias a 300 Hz.

- Error medio (%): 1.205
- Desviación típica: 0.56

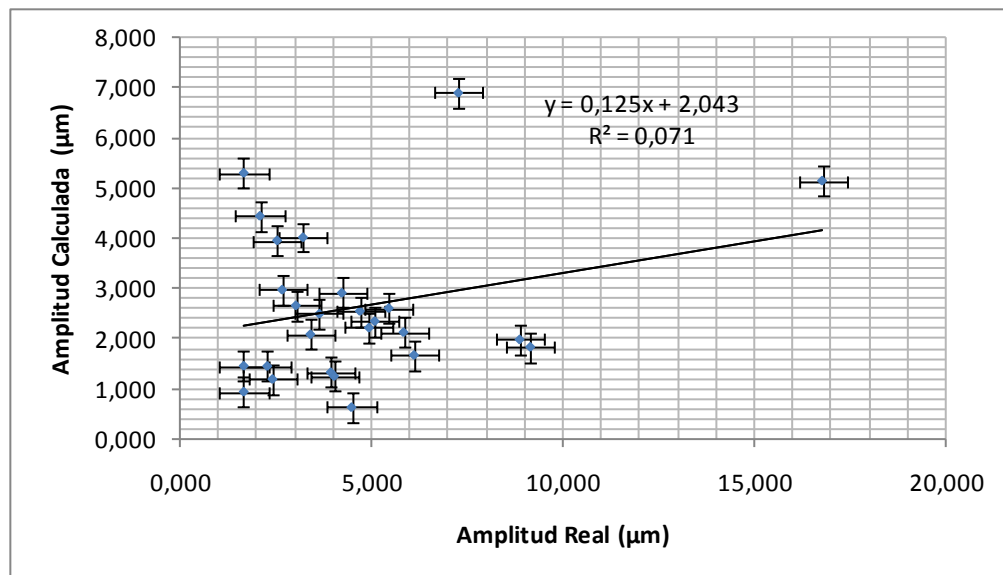
Tal y como se refleja en la Gráfica 7 (p. 83), el sistema se comporta de manera muy lineal desde las 2 micras hasta las 27 micras. Por tanto, los parámetros de calibración a 300 Hz son los siguientes:

Tabla 3. Calibración a 300 Hz.

300 Hz	Amplitud	Frecuencia
Rango	2 μm – 27 μm	-
Resolución	0.633 μm	6 Hz

5.5. Calibración a 500 Hz

Por último realizaremos un análisis a 500 Hz. El algoritmo desarrollado en LabVIEW fue diseñado para trabajar a frecuencias de 100 Hz, por lo que los resultados obtenidos a frecuencias de medio orden de magnitud superiores pueden no ser fiables. El número de muestras analizadas para este caso es de 26.



Gráfica 9. Amplitudes a 500 Hz.

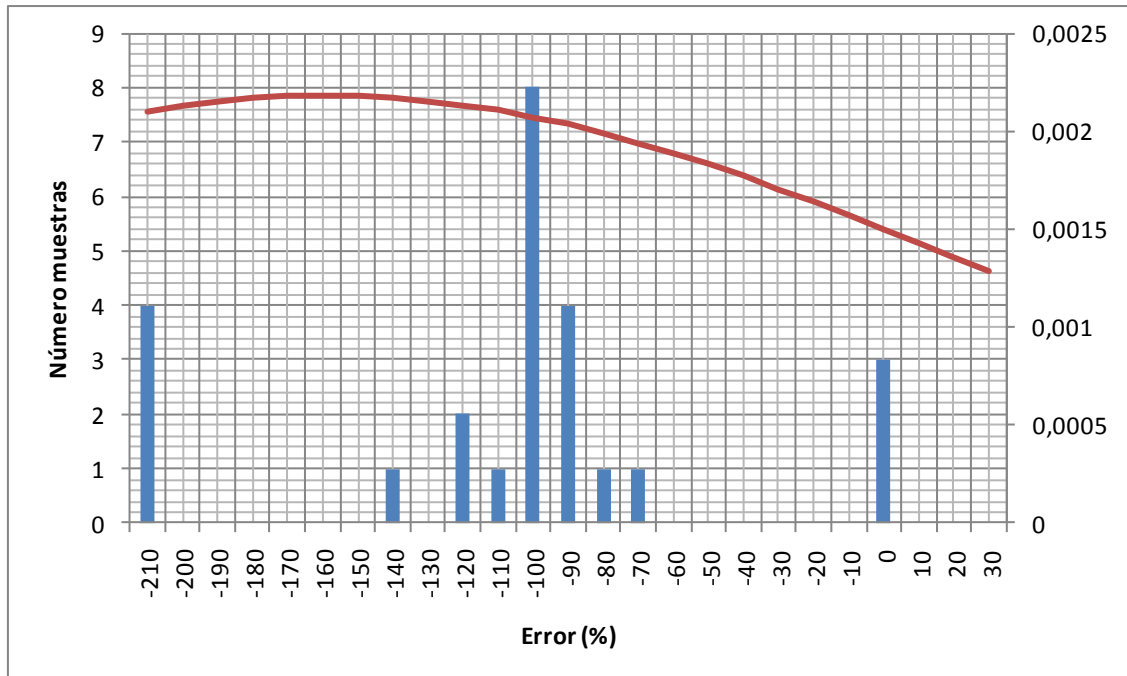
El valor de R^2 para el caso de 500 Hz es muy cercano a 0. Esto significa que no hay correlación entre la amplitud real y la amplitud calculada, por lo tanto el sistema no es capaz de calcular la amplitud de la vibración a esta frecuencia.

Si analizamos el error en el cálculo de la frecuencia a 500 Hz obtenemos la siguiente media de error y desviación típica:

- Error medio (%): -148.43
- Desviación típica: 182.95

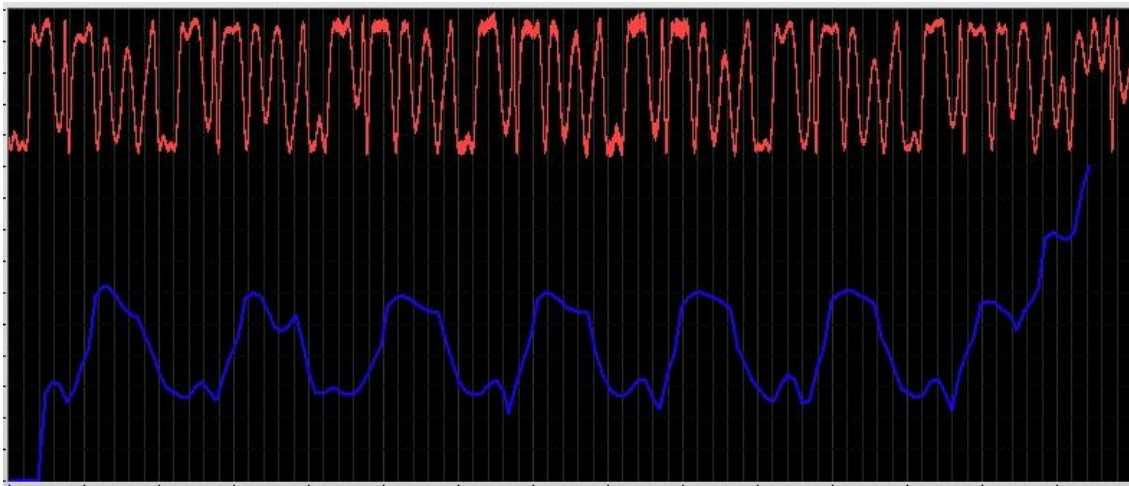
El error en el cálculo de la frecuencia es muy grande, por lo tanto al igual que sucede con el cálculo de la amplitud, el sistema no es capaz de obtener este parámetro.

Si observamos el histograma del porcentaje de error se puede ver como todos los errores se sitúan en torno al -100%.



Gráfica 10. Histograma error frecuencias a 500 Hz.

La causa principal por la cual el algoritmo no es capaz de demodular a esta frecuencia es la pérdida de información producida en el interferograma. A 500 Hz se producen otros efectos a parte de los predichos en el Capítulo 2.



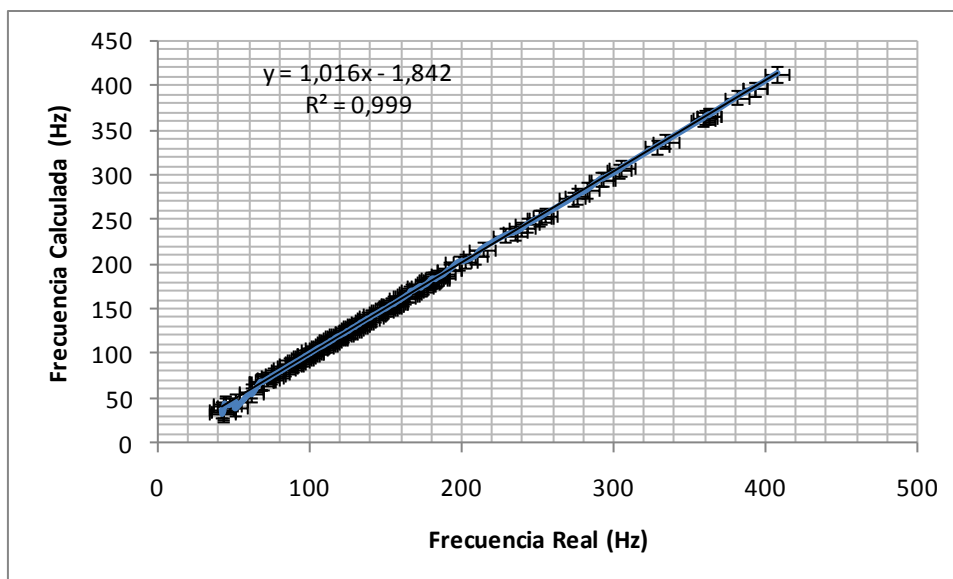
Captura de pantalla 34. Interferograma y tono fundamental a 500 Hz.

En la Captura de pantalla 34 se aprecia claramente como el interferograma pierde su forma de onda característica. Debido a esto, el algoritmo de demodulación calcula picos no válidos y por consiguiente arroja datos erróneos.

Por tanto, la calibración a 500 Hz no se puede llevar a cabo ya que el sistema no da una respuesta válida.

5.6. Calibración a frecuencia variable

Para estudiar la respuesta del sistema ante una frecuencia variable tomaremos 121 datos a distintas frecuencias. La amplitud para cada frecuencia también es variable. En esta ocasión representaremos la frecuencia calculada en función de la frecuencia real en lugar del histograma. Podemos hacer este estudio porque ahora la frecuencia se mueve dentro de un rango, en lugar de tomar un valor fijo como en los casos anteriores



Gráfica 11. Correlación a frecuencia variable.

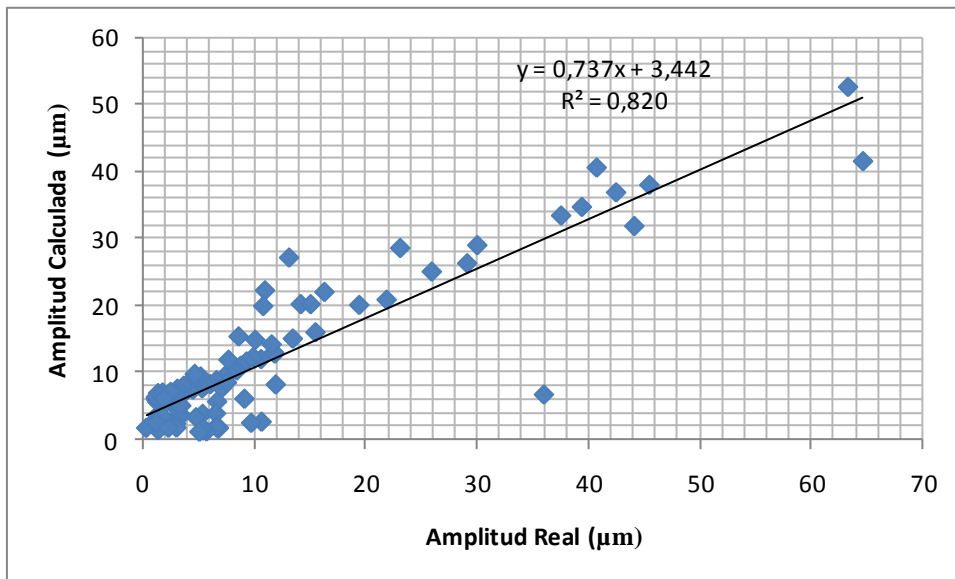
El valor de R^2 en este caso es prácticamente 1. Esto implica que el sistema se comporta de manera totalmente lineal. La ecuación de la recta sin embargo tiene un valor en la ordenada en el origen. Dado que el rango del cálculo de frecuencias comienza a partir de los 50 Hz, podemos despreciar la ordenada en el origen. Así pues, la expresión de la frecuencia es:

$$Frecuencia Real = \frac{Frecuencia Calculada}{1.016} = 0.984 \cdot Frecuencia calculada$$

$$Frecuencia Real \approx Frecuencia Calculada$$

El sistema da un valor del parámetro de la frecuencia calculada prácticamente igual que la frecuencia real, independientemente de a que frecuencia se esté trabajando. Sin embargo, lo que si varía es la resolución de la frecuencia como hemos observado en los apartados anteriores.

Si estudiamos ahora la relación entre las amplitudes reales y calculadas a frecuencias variables obtenemos la siguiente gráfica:



Gráfica 12. Amplitudes a frecuencia variable.

El valor de R^2 es de 0.82. Esto significa que los puntos se ajustan a una recta de una manera bastante lineal. Dado que los datos de la amplitud están tomados a frecuencias variables no podemos analizar como depende la amplitud calculada de la frecuencia de trabajo. Sin embargo, este estudio ya fue realizado en los apartados anteriores.

$$Frecuencia Real \approx Frecuencia Calculada$$

$$Amplitud Real (100 Hz) = \frac{Amplitud Calculada}{1.204} (\mu m)$$

$$Amplitud Real (200 Hz) = \frac{Amplitud calculada}{1.872} + 0.435 (\mu m)$$

$$Amplitud\ Real\ (300\ Hz) = 2.12 \cdot Amplitud\ Calculada - 1.39\ (\mu m)$$

5.7. Discusión de los resultados

El rango y la resolución para cada una de las frecuencias se encuentran resumidos en la siguiente tabla:

Tabla 4. Calibración del vibrómetro.

	Amplitud			Frecuencia		
Rango	100 Hz	200 Hz	300 Hz	50-400 Hz		
	0.633 μm	1.266 μm	2 μm			
	20 μm	8 μm	27 μm			
Resolución	0.633 μm Teórica			100 Hz	200 Hz	300 Hz
	Variable con la frecuencia			1 Hz	4 Hz	6 Hz

Dado que la amplitud calculada no siempre coincide con la amplitud real no tiene mucho sentido establecer una resolución. Sin embargo, el algoritmo desarrollado está diseñado para detectar cada pico en el interferograma, por lo tanto se propone una resolución teórica de la longitud de onda del láser empleado (633 nm).

Del estudio de la calibración podemos concluir que el sistema responde perfectamente ante un cálculo de la frecuencia. Este resultado se puede observar claramente en la Gráfica 11. Sin embargo el cálculo de la amplitud no ha resultado ser muy fiable, especialmente para frecuencias elevadas.

Para el caso de los 100 Hz, el cálculo de las amplitudes se realizaba de manera correcta con una calibración bastante buena. El valor de R^2 para el cálculo de las amplitudes a 100 Hz es de un 0.992, lo cual es bastante cercano a 1. En el caso de los 200 Hz obtenemos un R^2 de 0.954 y para 300 Hz R^2 toma un valor de 0.992. Para 500 Hz no existe correlación (el valor de R^2 es muy bajo).

Para explicar porque se obtienen buenos resultados a frecuencias de 100 Hz y 300 Hz y malos resultados a 200 Hz y 500 Hz debemos analizar una vez más el Set Up utilizado, ya que el algoritmo es el mismo para todas las frecuencias.

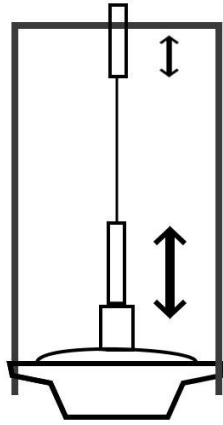


Ilustración 19. Vibraciones sobre los anclajes superior e inferior de la fibra óptica.

En la ilustración anterior se esquematiza el conjunto altavoz, fibra óptica y acelerómetro. El acelerómetro, situado sobre el altavoz, mide únicamente el desplazamiento que sufre el mismo inducido sobre el altavoz. Si la parte superior de la fibra óptica estuviera realmente estática, el desplazamiento sufrido por el acelerómetro y la elongación producida sobre la fibra óptica serían exactamente iguales.

Sin embargo esto no es así. Se comprobó experimentalmente como en la parte superior del anclaje de la fibra óptica se producía una pequeña vibración. Para comprobar esto basta con situar la mano sobre la parte superior del montaje y comprobar cómo efectivamente se siente una pequeña vibración.

Este comportamiento explica porqué se obtienen distintas expresiones a la hora de calcular la amplitud para cada frecuencia estudiada. Si la vibración superior está en fase con la vibración inferior, entonces la elongación producida sobre la fibra óptica será menor que el desplazamiento medido mediante el acelerómetro. Si por el contrario están desfasadas cerca de 180 grados, la elongación producida sobre la fibra óptica será mucho mayor que la medida mediante el acelerómetro. El que a 100 Hz o a 300 Hz se obtengan mejores resultados que a 200 ó 500 Hz depende de los materiales y disposición del conjunto altavoz-acelerómetro-fibra óptica construido en el laboratorio.

Capítulo 6. Conclusiones

En este proyecto se ha desarrollado un sistema para obtener la medida de los parámetros característicos de una vibración mediante fibra óptica. Utilizando esta tecnología podemos incluir el sistema en medios hostiles, ya que el único requisito necesario para la obtención de una medida fiable es el anclaje de un extremo de fibra óptica a la máquina. Gracias a esto podemos evitar colocar costosos equipos de medida de vibración cerca de grandes máquinas eléctricas como pueden ser generadores y transformadores. Además la fibra óptica está libre de las interferencias que las máquinas eléctricas pueden inducir sobre sistemas electrónicos.

Para realizar el proyecto se ha realizado la integración de diferentes sistemas. En primer lugar se ha conseguido incorporar la fibra óptica y el acelerómetro en un dispositivo sometido a vibraciones controladas. Para realizar tales vibraciones se llevó a cabo el montaje de un instrumento basado en un altavoz. La vibración inducida en este quedó totalmente controlada mediante el generador de funciones utilizado.

Posteriormente se ha adquirido la señal eléctrica obtenida a la salida del interferómetro y la proporcionada por el acelerómetro. La adquisición realizada mediante el módulo CS328A de CleverScope ha requerido una programación de los drivers proporcionados. Mediante esta programación se ha conseguido adquirir las señales permitiendo al usuario definir el tiempo de adquisición y el número de muestras. Además mediante la programación de los drivers se ha alcanzado la integración del hardware de adquisición de datos con el lenguaje de programación LabVIEW.

Una vez adquirida la señal, se implementó en un instrumento virtual el algoritmo desarrollado para la demodulación de la señal de interferencia y la obtención de los parámetros característicos de la vibración. Para que el algoritmo proporcione datos correctos es necesario que la vibración producida sobre la fibra óptica tenga una forma sinusoidal o que la amplitud de los armónicos sea mucho menor que la frecuencia

principal de vibración. Si no se cumple esta premisa, se obtienen peores resultados mediante este sistema.

Por último se ha realizado una calibración del sistema. El umbral del vibrómetro desarrollado se corresponde con la longitud de onda del láser del sistema. En nuestro caso ese umbral se sitúa en los 633 nm. Ya que el algoritmo diseñado para la obtención de la amplitud se basa en calcular el número de picos contenidos en un periodo de vibración del interferograma, la resolución del sistema coincide con el umbral. El rango de medida de amplitudes se sitúa entre 0.633 micras y 20 micras. A la hora de calcular frecuencias, el sistema proporciona resultados con una resolución dependiente de la frecuencia de vibración. El rango de frecuencias para el vibrómetro se sitúa desde los 50 Hz a los 300 Hz.

Las limitaciones en la resolución y el rango del vibrómetro desarrollado se deben a la forma de onda obtenida a la salida del interferómetro ya que a altas frecuencias el sistema físico no se comporta de manera adecuada y no se obtiene la forma del interferograma deseada. Sin embargo, el instrumento virtual diseñado en LabVIEW es capaz de obtener resultados válidos para vibraciones de hasta 1kHz demodulando interferogramas simulados.

Por esta razón, como líneas de trabajo futuro se propone mejorar el dispositivo de vibraciones controladas para obtener un interferograma de mayor calidad en frecuencias de vibración e índices de modulación altos. De este modo será posible la utilización del instrumento virtual desarrollado ampliando el rango de frecuencias y amplitudes de la vibración.

Para mejorar la resolución alcanzada en este proyecto se sugiere desarrollar el algoritmo de demodulación midiendo la fase total del desplazamiento. Para llevar a cabo esta tarea será necesario tener en cuenta el valor de todos los picos y valles leídos en el interferograma.

Referencias

- [1] Larrosa Garreta, Carlos; Marès Martí, Pere; Villafafila Robles, Roberto. *Monitorización de datos en sistemas industriales*. 2011
- [2] Jesús A. Royo; Gloria Rabanaque; Fernando Torres. *Análisis de vibraciones e interpretación de datos*. Universidad de Zaragoza.
- [3] Anguera Barea, Javier. *Normas referentes a máquinas eléctricas rotativas: estudio de las condiciones necesarias en los ensayos a realizar según norma IEC/UNE 60034*. Universitat Politècnica de Catalunya.
- [4] Navidad Mencía, David; García Souto, José Antonio. *Sistema multiplexado de adquisición de señales ultrasónicas con aplicación en emisión acústica de descargas parciales* 2009. Universidad Carlos III de Madrid.
- [5] P. Hariharan, *Optical Interferometry*, 2nd ed. Academic Press, 2003, p. 351.
- [6] J.A. García-Souto, and H. Lamela, “Comparative analysis of optical-fibre interferometric sensors versus accelerometers: application to vibrations inside high-power transformers”, *Journal of Optics A: Pure and Applied Optics* 4, 318-326 (2002).
- [7] William R. Finley Mark M. Hodowanec Warren G. Holter, *An Analytical Approach to Solving Motor Vibration Problems*, pp. 2 – 16.
- [8] Posada Román, Julio Enrique. *Sistema de Instrumentación con Sensor de Fibra Óptica para la medida de Emisiones Acústicas de Ultrasonidos Procedentes de Descargas Parciales*. (2012).
- [9] Jackson, D.A. and Jones, J.D.C. Interferometers, in Dakin and Cuishaw (eds), *Optical Fibre Sensors*, Artech House Publishing, pp. 329–376. (1989)

Bibliografía

José Miguel López Higuera; *"Handbook of Optical Fibre Sensing Technology"*, Wiley, 2002

C. Macià-Sanahuja, H. Lamela, and J. A. García-Souto, "Fiber optic interferometric sensor for acoustic detection of partial discharges", *J. Opt. Technol.* 74, 122-126. (2007)

J A García-Souto and H Lamela-Rivera, "Comparative analysis of optical-fibre interferometric sensors versus accelerometers: application to vibrations inside high-power transformers" *J. Opt. A: Pure Appl. Opt.* 4 S318 (2002)

J A García-Souto and H Lamela-Rivera "High resolution ($<1\text{nm}$) interferometric fiber-optic sensor of vibrations in high-power transformers". *Optics Express*. Vol. 14 (21). (2006)

TIPLER-MOSCA; *"Física para la Ciencia y la Tecnología"* Vol 2A, Electricidad y Magnetismo, Editorial Reverté, 2005

Grillo Ortega, Gustavo Jacinto ; Ferrero Martín, Francisco Javier ; Pérez García, Miguel Ángel ; Álvarez Antón, Juan Carlos ; Campo Rodríguez, Juan Carlos; *"INSTRUMENTACIÓN ELECTRÓNICA"*, Editorial Thomson 2004

Lajara Vizcaíno, José Rafael; *"LabVIEW: entorno gráfico de programación"*, Marcombo 2011

Ilustraciones

Ilustración 1. Onda electromagnética.

<http://diceunfisico.blogspot.com.es/2013/03/opaco-o-transparente.html>

Ilustración 2. Onda sinusoidal.

<http://topaudioprofesional.blogspot.com.es/2012/03/amplitud-de-onda.html>

Ilustración 3. Espectro electromagnético. Electromagnetic Wave Spectrum. 15 Febrero 2005. Horst Frank and Jailbird. Original:

<http://www.zeitmaschinen.com/svg/Spektrum.svg>

Ilustración 4. Diferentes tipos de luz. 11 de agosto de 2009. Armando Martínez. Original: <http://la-mecanica-cuantica.blogspot.com.es/2009/08/el-laser.html>

Ilustración 5. Interferencia de la luz. Abril de 2010. http://primerodebachilleratofis.blogspot.com.es/2010_04_01_archive.html

Anexos

Hojas de característica

Tabla 5. Especificaciones generador funciones.

Frecuencia de salida	2 Hz – 2 MHz
Amplitud de salida	0 – 5V
Formas de onda	Cuadrada, Sinusoidal, Triangular, Diente de sierra.
Control DC	0 – 5V
Resistencia de salida	50 Ω

Tabla 6. Requisitos LabVIEW.

	Run-Time Engine	Entorno de Desarrollo
Procesador	Pentium III/Celeron 866 MHz o equivalente	Pentium 4/M o equivalente
RAM	256 MB	1 GB
Resolución de Pantalla	1024 x 768 píxeles	1024 x 768 píxeles
Sistema Operativo	Windows 8/7/Vista (32 bits y 64 bits)	Windows 8/7/Vista (32 bits y 64 bits)
	Windows XP SP3 (32 bits)	Windows XP SP3 (32 bits)
Espacio en Disco	353 MB	3.67 GB

Tabla 7. Especificaciones acelerómetro.

Frecuencia	0.1 - 4800 Hz
Sensibilidad	100 pC/g
Temperatura	-74 - 250 °C
Nivel de ruido residual en el rango de frecuencia especificado (RMS) ±	0.02 mg
Nivel operacional máximo (pico)	2000 g
Nivel máximo de choque (± pico)	2000 g
Peso	43 gramos
Conector eléctrico	10-32 UNF
Montaje	Stud
Salida	Charge-PE
Frecuencia de resonancia	16 kHz

Tabla 8. Especificaciones módulo CS328A.

2 canales analógicos de 10 bits.
Frecuencia de muestreo de 100MS/s.
8 entradas digitales.
Detector de offset automático para una mejor visualización.
Trigger analógico externo.
Interfaz con el PC mediante USB 2.0 o Ethernet (100Mbit).

Manuales

Manual Acelerómetro – Acondicionador (Inglés).

<http://www.bksv.com/doc/bb0694.pdf>

Manual Cleverscope (Inglés).

<http://www.cleverscope.com/resources/#resource9>

Códigos Matlab

Simulación 1

```
t=linspace(0,8*pi,2000);
w=1;
A=1;
fi=0;
y1=A*seno(w,t,fi)+6;
A3=A*sin(2+2*cos(t));
plot(t,A3);
xlabel('Desplazamiento (\Delta (L1 - L2)) (\lambda rads)');
ylabel('Amplitud Interferencia');
grid on;
```

Simulación 2

```
t=linspace(0,8*pi,2000);
w=1;
A=8;
fi=0;
y1=A*seno(w,t,fi)+3;
y2=A*sawtooth(t,1);
A1=cos(2+2*(t));
A2=cos(2+2*cos(y1));
A3=cos(2+2*(y2));
subplot(3,2,1);
plot(t,t);
```

Vibrómetro de fibra óptica codificado en frecuencia

```
xlabel('Tiempo');
ylabel('Desplazamiento');
grid on;
subplot(3,2,2)
plot(t,A1);
xlabel('Tiempo');
ylabel('AmplitudInterferencia');
grid on;
subplot(3,2,3);
plot(t,y1);
xlabel('Tiempo');
ylabel('Desplazamiento');
grid on;
subplot(3,2,4);
plot(t,A2);
xlabel('Tiempo');
ylabel('AmplitudInterferencia');
grid on;
subplot(3,2,5);
plot(t,y2);
xlabel('Tiempo');
ylabel('Desplazamiento');
grid on;
subplot(3,2,6);
plot(t,A3);
xlabel('Tiempo');
ylabel('Amplitud Interferencia');
grid on;
```

Simulación 3

```
t=linspace(0,0.04,2000);
w=100*pi;
A=20;
fi=0;
y1=A*seno(w,t,fi)+4;
A2=cos(2+2*cos(y1));
subplot(2,2,1);
plot(t,y1);
grid on;
title('Vibración 1');
subplot(2,2,3);
plot(t,A2);
grid on;
title('Interferograma 1');
A=35;
fi=0;
y1=A*seno(w,t,fi)-7;
A2=cos(2+2*cos(y1));
subplot(2,2,2);
plot(t,y1);
grid on;
title('Vibración 2');
subplot(2,2,4);
plot(t,A2);
grid on;
title('Interferograma 2');
```

Datos calibración

Calibración a 100 Hz

<u>Amplitud</u>	<u>Amplitud</u>	<u>Frecuencia</u>	<u>Frecuencia</u>	<u>Amplitud</u>	<u>Amplitud</u>	<u>Frecuencia</u>	<u>Frecuencia</u>
<u>Real</u>	<u>Calculada</u>	<u>Real</u>	<u>Calculada</u>	<u>Real</u>	<u>Calculada</u>	<u>Real</u>	<u>Calculada</u>
1,127	1,283	100,066	104,812	9,804	12,534	99,952	100,373
1,690	1,914	100,128	103,360	9,953	12,286	99,969	100,464
1,709	2,264	100,144	101,373	9,996	10,763	99,845	99,982
2,792	3,890	100,016	101,703	10,018	12,217	100,000	100,388
2,799	3,826	100,084	101,324	10,287	12,693	100,021	100,366
2,799	3,257	100,085	102,032	10,295	12,380	100,018	100,343
4,878	6,359	99,936	100,784	10,529	12,230	100,784	100,927
4,880	5,987	99,849	100,447	10,628	11,934	100,728	100,782
4,896	6,464	99,895	100,369	10,657	13,274	99,934	100,141
4,925	5,872	103,474	103,749	10,801	13,407	99,986	100,331
4,965	6,098	103,493	103,813	11,153	13,778	99,997	100,498
5,073	5,981	103,518	104,515	11,158	13,657	100,039	100,234
5,557	6,985	100,779	100,813	11,161	13,805	99,999	100,304
5,765	6,472	99,990	100,244	12,098	14,506	99,978	100,368
5,784	6,697	99,727	100,434	12,168	14,744	99,980	100,357
6,072	7,616	100,140	100,776	12,190	14,823	99,973	100,354
6,341	7,306	100,842	100,717	12,219	15,028	99,916	100,041
6,548	8,615	99,961	100,117	12,540	15,126	100,022	100,437
6,579	8,218	99,939	100,137	12,983	15,863	99,957	100,261
6,582	8,211	100,012	100,214	13,008	15,774	99,996	100,322
6,592	8,553	99,883	99,910	13,053	15,780	99,989	100,286
6,593	8,374	99,967	100,163	15,648	18,299	100,009	100,319
6,597	8,219	99,894	100,119	15,661	18,381	99,990	100,298
7,458	9,401	99,897	100,156	16,457	19,564	100,003	100,303
7,785	9,506	100,815	100,713	16,676	19,901	100,007	100,196
7,829	9,334	100,785	100,881	17,695	20,925	99,923	100,206
7,919	9,905	100,019	100,655	18,322	21,862	100,026	100,255
8,803	10,894	99,856	100,228	18,976	21,539	100,007	100,289
8,985	11,455	99,990	100,161	20,733	24,087	99,997	100,192
9,198	10,671	100,754	100,845	22,691	21,482	100,000	100,187
9,259	11,486	99,982	100,581	22,722	22,126	99,957	100,130
9,288	11,428	99,943	100,391	22,737	20,431	99,992	100,304
9,290	11,357	99,982	100,328	22,741	21,891	99,954	100,121
9,564	10,909	100,783	100,819	25,032	14,582	99,985	100,384
9,660	11,578	100,026	100,458	25,228	14,579	100,013	100,407
9,707	12,085	99,969	100,176	27,002	12,818	99,723	100,003
9,739	12,096	99,930	100,087				

Calibración a 200 Hz

<u>Amplitud</u>	<u>Amplitud</u>	<u>Frecuencia</u>	<u>Frecuencia</u>	<u>Amplitud</u>	<u>Amplitud</u>	<u>Frecuencia</u>	<u>Frecuencia</u>
<u>Real</u>	<u>Calculada</u>	<u>Real</u>	<u>Calculada</u>	<u>Real</u>	<u>Calculada</u>	<u>Real</u>	<u>Calculada</u>
1,231	2,126	201,520	208,404	4,352	5,949	201,072	202,182
1,331	1,887	201,520	209,628	4,365	6,879	201,513	202,433
1,396	1,922	201,462	205,813	4,466	6,896	200,873	201,955
1,437	1,716	201,452	212,140	4,485	6,409	201,326	202,489
1,467	1,855	201,515	204,764	4,518	7,469	201,406	203,389
1,539	1,852	201,511	205,059	4,521	6,949	201,038	202,682
1,542	1,897	201,532	208,549	4,540	6,893	201,131	202,042
1,544	1,925	201,443	205,507	4,577	6,885	201,043	202,265
1,600	1,841	201,500	206,271	4,590	7,050	201,066	202,027
1,601	2,006	201,408	205,126	4,627	6,891	201,206	202,091
1,603	2,115	201,522	202,030	4,630	7,884	201,542	202,720
1,731	2,057	201,592	207,722	4,631	6,894	201,071	202,008
1,805	2,157	201,488	205,412	4,706	7,278	201,132	202,217
1,939	2,537	201,575	205,839	4,706	7,117	201,227	202,351
2,055	2,536	201,613	205,917	4,709	7,583	201,030	202,437
2,169	3,173	201,583	204,458	4,727	7,206	200,964	202,032
2,234	2,855	201,523	205,068	4,767	8,197	201,392	202,719
2,417	3,101	201,486	204,114	4,799	7,427	201,111	202,418
2,591	3,715	201,463	204,475	4,809	7,217	201,005	201,740
2,655	3,632	201,535	204,800	4,835	7,366	201,082	201,955
2,694	3,703	201,591	205,151	4,871	7,489	201,042	202,866
2,734	3,112	201,299	203,398	4,904	8,194	201,466	202,775
2,745	3,169	201,313	204,727	4,936	7,649	201,033	202,750
2,752	3,102	201,357	204,087	5,016	8,417	201,375	203,053
2,797	3,956	201,550	203,995	5,179	9,197	201,318	203,035
2,825	3,706	201,512	204,979	5,331	8,982	201,616	202,604
2,856	4,379	201,457	202,352	5,344	8,827	201,459	202,588
2,859	3,706	201,380	204,951	5,380	7,467	199,957	201,328
2,883	3,712	201,164	204,618	5,395	9,047	201,468	202,917
2,923	4,361	201,338	203,215	5,421	7,533	199,962	201,660
2,933	3,234	201,490	205,546	5,445	7,942	199,930	201,248
3,014	4,360	201,577	203,244	5,484	7,634	199,957	201,067
3,076	4,434	201,511	203,446	5,502	7,532	199,930	201,698
3,148	4,379	201,467	202,390	5,518	9,928	201,541	202,439
3,152	4,119	201,344	203,643	5,521	7,471	200,077	201,221
3,158	4,386	201,236	202,069	5,538	7,538	200,086	201,534
3,158	3,859	201,026	205,066	5,545	9,778	201,466	202,313
3,160	4,643	201,513	204,502	5,578	9,774	201,451	202,394
3,162	3,714	201,093	204,517	5,580	8,257	200,026	201,247
3,207	4,585	201,467	203,641	5,587	8,105	199,865	201,102
3,228	4,432	201,352	203,548	5,641	8,199	199,908	200,728

3,236	4,122	201,089	203,484	5,686	8,198	199,917	200,767
3,285	4,894	201,546	203,700	5,703	10,148	201,474	202,719
3,289	4,368	201,117	202,886	5,740	9,612	201,384	202,497
3,292	4,438	201,337	203,251	5,752	9,396	201,416	202,117
3,380	4,374	201,224	202,601	5,807	10,497	201,400	202,023
3,380	4,656	201,230	203,914	5,830	8,199	199,907	200,732
3,389	4,374	201,196	202,590	5,876	10,071	201,324	202,697
3,414	5,053	201,486	203,561	5,948	9,992	201,503	202,730
3,554	4,908	201,229	203,130	5,991	10,333	201,560	202,158
3,573	4,750	201,162	203,245	6,010	10,490	201,251	202,144
3,602	5,059	201,111	203,324	6,084	10,710	201,473	202,422
3,604	4,904	201,505	203,288	6,135	10,867	201,494	202,419
3,608	4,495	201,317	204,202	6,162	10,609	201,458	202,858
3,652	5,064	201,141	203,109	6,184	10,711	201,440	202,411
3,719	4,655	201,180	203,967	6,186	10,622	201,514	202,626
3,734	4,976	201,148	203,518	6,225	10,620	201,524	202,660
3,738	5,619	201,477	202,777	6,226	10,717	201,522	202,302
3,795	6,237	201,537	202,991	6,230	11,334	201,466	202,456
3,881	5,066	201,147	203,037	6,235	11,353	201,300	202,108
3,890	5,051	201,203	203,634	6,252	11,350	201,330	202,168
3,900	6,305	201,561	203,301	6,270	10,933	201,487	202,648
3,904	5,155	201,196	202,613	6,373	11,355	201,336	202,072
4,054	6,621	201,378	203,150	6,426	11,124	201,412	202,004
4,103	6,407	201,472	202,538	6,506	11,269	201,407	202,215
4,254	5,791	201,202	202,217	6,702	11,032	201,469	202,250
4,285	5,705	201,163	202,491	6,878	10,868	201,415	202,400

Calibración a 300 Hz

<u>Amplitud</u>	<u>Amplitud</u>	<u>Frecuencia</u>	<u>Frecuencia</u>	<u>Amplitud</u>	<u>Amplitud</u>	<u>Frecuencia</u>	<u>Frecuencia</u>
<u>Real</u>	<u>Calculada</u>	<u>Real</u>	<u>Calculada</u>	<u>Real</u>	<u>Calculada</u>	<u>Real</u>	<u>Calculada</u>
2,002	1,755	300,620	306,649	11,917	6,234	300,524	302,084
2,484	1,436	300,649	308,661	11,982	6,759	300,335	302,034
2,885	1,905	300,697	307,304	12,249	6,595	300,274	302,333
3,001	2,213	302,635	307,500	12,511	6,690	300,287	300,409
3,025	1,947	302,680	308,864	12,512	6,936	300,376	301,176
3,226	1,940	302,605	309,932	12,692	7,004	300,414	302,750
3,273	2,000	302,771	308,551	12,747	6,909	300,372	302,365
3,370	1,921	300,386	304,747	12,967	6,833	300,419	303,381
3,708	2,566	302,583	308,400	13,094	7,333	300,379	302,139
3,770	2,475	302,561	306,971	13,155	7,092	300,364	301,258
3,775	2,804	302,554	304,716	13,207	6,974	300,387	301,809

Vibrómetro de fibra óptica codificado en frecuencia

3,784	2,465	302,441	308,095	13,257	7,321	300,325	302,624
3,842	1,861	302,482	306,175	13,508	6,952	300,374	302,767
3,858	2,326	300,394	306,138	13,743	7,805	300,313	302,104
4,059	1,863	300,405	305,832	13,750	7,597	300,637	302,051
4,106	2,119	300,373	306,157	13,967	7,611	300,774	303,571
4,370	2,476	300,416	306,761	14,068	7,661	300,233	301,583
4,373	2,487	300,291	305,479	14,121	7,595	300,701	302,131
4,580	2,481	300,406	306,168	14,200	7,758	300,685	301,884
4,666	2,487	300,491	305,430	14,258	7,816	300,207	301,674
4,667	2,589	300,185	305,587	14,335	7,486	300,612	302,279
4,836	3,184	300,372	303,210	14,439	7,665	300,287	301,410
4,957	2,470	300,730	307,550	14,562	7,717	300,380	301,442
5,109	3,228	300,143	303,965	14,661	7,823	300,208	301,403
5,360	3,001	300,423	305,862	14,696	7,819	300,266	301,558
5,589	3,188	300,206	302,839	14,882	7,886	300,278	300,998
5,678	3,180	300,311	303,558	14,970	7,659	300,228	301,653
5,712	3,277	300,205	304,198	15,090	7,916	300,534	301,856
5,812	3,117	300,601	304,601	15,172	7,880	300,363	301,229
5,839	2,959	300,667	304,827	15,270	7,969	300,348	301,843
5,887	3,183	300,375	303,282	15,515	8,117	300,206	300,229
5,893	3,125	300,184	303,865	15,567	7,980	300,175	301,436
5,920	3,116	300,383	304,753	15,734	7,880	300,501	301,220
6,057	3,221	300,486	304,581	15,882	8,187	300,372	301,525
6,167	3,175	300,413	304,084	16,050	8,190	300,710	301,426
6,239	3,293	300,222	302,724	16,070	7,731	300,319	300,904
6,375	4,194	300,228	301,835	16,419	7,968	300,313	301,881
6,455	3,285	300,324	303,514	16,669	8,117	300,367	302,204
6,490	3,817	300,358	302,637	16,892	8,195	300,241	301,233
6,655	3,639	300,184	304,399	16,926	8,696	300,632	302,076
6,687	3,532	300,609	304,642	17,112	8,349	300,166	301,358
6,842	3,511	300,396	301,987	17,227	8,401	300,237	301,382
6,899	4,388	300,180	302,957	17,442	8,718	300,608	301,310
6,978	3,813	300,343	302,988	17,618	8,621	300,189	301,035
7,125	4,336	300,341	302,951	17,966	9,045	300,205	300,933
7,126	3,772	300,481	302,046	18,096	8,826	300,482	301,223
7,422	4,192	300,286	301,986	18,266	8,974	300,620	301,545
7,477	4,193	300,328	301,932	18,371	9,194	300,249	301,224
7,481	4,441	300,223	302,883	18,706	9,280	300,690	301,842
7,524	3,774	300,340	301,880	18,850	9,100	300,388	300,841
7,723	4,343	300,221	302,431	18,879	9,224	300,318	301,963
7,806	4,384	300,232	303,202	19,022	9,386	300,632	301,800
7,899	4,439	300,210	303,008	19,285	9,829	300,313	301,062
8,043	4,439	300,508	303,030	19,387	9,604	300,419	301,529
8,139	4,434	300,790	303,340	19,648	9,235	300,463	301,597
8,265	4,870	300,285	302,224	19,820	9,828	300,242	301,112
8,388	5,076	300,428	302,395	20,200	9,496	300,490	301,638

8,423	4,512	300,300	301,638	20,376	9,969	300,358	301,616
8,552	5,293	300,193	301,987	20,484	10,216	300,187	300,526
8,645	5,072	300,458	302,623	20,578	10,204	300,349	300,857
8,730	5,243	300,366	301,846	20,912	10,475	299,901	300,635
8,786	5,183	300,616	302,292	21,102	10,566	300,295	301,057
8,847	4,646	300,796	303,157	21,114	10,670	300,276	301,073
8,944	5,122	300,241	302,788	21,374	10,811	300,432	301,545
9,008	5,352	300,473	301,595	21,669	10,825	300,175	301,162
9,074	5,288	300,508	302,255	21,957	11,032	300,325	301,249
9,171	5,360	300,180	301,158	22,087	10,934	300,349	301,053
9,287	5,015	300,286	302,919	22,321	11,179	300,399	301,530
9,541	5,077	300,387	302,376	22,581	11,016	300,317	301,677
9,545	5,606	300,358	302,050	22,899	11,448	300,339	301,353
9,611	5,819	300,337	301,894	23,425	11,575	300,153	300,772
9,658	5,101	300,680	304,012	23,645	11,925	300,412	301,248
9,827	5,843	300,414	303,325	23,968	11,992	300,487	300,871
9,872	5,278	300,475	302,838	24,604	12,256	300,199	300,862
9,966	5,746	300,606	302,953	24,626	12,250	300,470	301,003
10,058	5,388	300,408	302,498	25,205	12,561	300,347	301,110
10,208	5,812	300,411	302,214	25,211	12,451	300,411	301,218
10,213	5,277	300,779	302,872	25,849	13,189	300,415	301,170
10,353	5,909	300,329	302,647	25,870	13,092	300,234	300,987
10,380	6,059	300,502	300,356	26,066	12,975	300,363	301,261
10,513	5,856	300,637	302,647	26,318	13,169	300,500	301,627
10,712	6,124	300,331	302,324	26,377	13,155	300,485	300,741
10,933	5,858	300,509	302,581	26,716	13,465	300,136	300,879
11,006	6,167	300,263	302,776	26,968	13,286	300,374	301,356
11,148	5,819	300,373	301,860	27,062	13,358	300,381	300,915
11,376	6,039	300,460	303,978	27,153	13,422	300,159	300,664
11,401	5,978	300,386	301,772	27,231	13,652	300,537	301,383
11,447	6,313	300,447	300,786	27,267	13,563	300,474	301,038
11,532	6,645	300,780	302,443	27,394	13,773	300,285	301,034
11,535	6,607	300,314	301,815	27,429	13,715	300,163	301,153
11,705	6,494	300,264	302,187	27,430	13,562	300,358	301,053
11,756	5,914	300,706	302,396	27,460	13,735	300,164	300,717
11,836	6,605	300,308	301,866				

Calibración a 500 Hz

<u>Amplitud</u>	<u>Amplitud</u>	<u>Frecuencia</u>	<u>Frecuencia</u>	<u>Amplitud</u>	<u>Amplitud</u>	<u>Frecuencia</u>	<u>Frecuencia</u>
<u>Real</u>	<u>Calculada</u>	<u>Real</u>	<u>Calculada</u>	<u>Real</u>	<u>Calculada</u>	<u>Real</u>	<u>Calculada</u>
1,646	5,297	502,649	62,737	4,005	1,244	502,675	508,640

Vibrómetro de fibra óptica codificado en frecuencia

1,645	0,933	502,841	271,275	4,207	2,905	502,662	268,754
1,645	1,449	502,775	218,384	4,461	0,624	502,820	1048,190
2,067	4,440	502,907	76,038	4,680	2,542	502,989	257,295
2,260	1,444	502,719	233,717	4,917	2,211	502,727	257,670
2,396	1,186	502,671	266,853	5,067	2,341	502,757	279,380
2,518	3,951	502,661	250,971	5,434	2,600	502,944	251,603
2,648	2,968	503,287	255,950	5,820	2,120	502,760	238,834
3,007	2,655	502,834	254,334	6,093	1,665	502,818	266,150
3,193	4,013	503,172	89,374	9,132	1,827	502,199	519,640
3,387	2,079	502,784	304,519	8,853	1,975	502,085	256,412
3,621	2,487	502,644	254,505	7,251	6,894	501,996	88,759
3,918	1,322	502,699	510,627	16,756	5,142	502,036	254,428

Calibración a frecuencia variable

<u>Amplitud</u>	<u>Amplitud</u>	<u>Frecuencia</u>	<u>Frecuencia</u>	<u>Amplitud</u>	<u>Amplitud</u>	<u>Frecuencia</u>	<u>Frecuencia</u>
<u>Real</u>	<u>Calculada</u>	<u>Real</u>	<u>Calculada</u>	<u>Real</u>	<u>Calculada</u>	<u>Real</u>	<u>Calculada</u>
41,808	37,752	16,310	22,077	140,807	142,292	1,922	5,338
42,066	33,104	10,977	22,309	142,940	144,085	1,760	6,443
42,443	34,916	13,137	27,194	146,218	147,302	1,504	5,658
42,923	36,447	14,183	20,262	148,056	149,290	1,320	5,724
43,679	44,668	44,081	31,885	149,465	150,248	1,236	6,039
44,296	42,853	29,101	26,342	150,446	151,141	1,204	6,282
46,862	43,132	23,098	28,618	151,696	152,616	1,201	6,429
50,845	47,047	40,708	40,588	153,051	154,247	1,253	6,429
50,997	39,573	8,615	15,462	153,798	154,682	1,390	7,025
61,419	58,922	64,580	41,540	154,856	155,735	1,796	7,113
61,553	54,972	63,233	52,585	155,389	155,724	15,068	20,257
67,350	69,110	45,431	38,011	156,104	156,977	2,513	7,191
67,925	68,354	39,380	34,727	160,692	161,893	3,472	5,148
68,130	68,916	42,448	36,894	162,798	164,232	3,384	3,919
68,644	68,755	37,519	33,451	163,665	165,382	3,326	3,445
71,736	71,937	30,003	29,038	165,345	167,174	3,133	3,597
73,749	73,957	25,926	25,107	166,345	170,157	3,005	2,480
76,141	76,616	21,881	20,930	168,582	171,170	2,593	2,527
78,158	78,549	19,425	20,147	172,532	175,535	1,940	2,344
81,694	82,044	15,503	16,074	172,912	173,582	6,685	5,774
83,892	84,338	13,471	15,136	174,039	175,477	1,720	3,487
86,093	86,695	11,863	12,899	176,587	177,744	1,465	3,799
87,172	87,825	11,764	13,094	178,000	179,854	1,389	3,461
88,202	88,730	11,578	14,268	179,277	181,957	1,368	2,493
91,036	91,639	10,630	12,088	179,585	183,166	1,383	2,650

92,465	92,960	9,925	12,370	181,221	184,208	1,369	2,635
93,847	94,449	9,325	11,729	182,420	183,159	4,722	9,562
95,385	96,022	8,800	11,097	182,921	183,786	4,682	9,873
96,680	97,588	8,454	10,378	184,100	185,140	1,259	3,191
98,038	98,717	8,035	10,366	187,921	188,632	1,356	3,803
98,846	99,661	7,742	9,951	191,594	194,407	1,807	3,256
100,039	100,929	7,336	9,303	191,709	193,335	1,782	3,602
100,093	100,869	7,352	9,518	197,483	202,343	1,399	1,512
102,716	103,702	6,635	8,953	201,677	203,566	1,029	2,695
104,961	106,150	6,076	8,349	208,671	209,007	1,895	6,209
106,824	107,687	5,651	8,229	213,270	217,384	0,327	1,844
108,413	109,000	5,345	7,743	228,682	232,302	1,206	2,634
109,382	109,993	5,213	9,496	235,153	235,888	7,703	11,986
110,735	111,469	4,970	9,370	239,506	239,790	10,106	14,959
112,714	113,256	4,658	8,384	243,061	244,574	3,362	5,219
113,565	114,779	4,511	7,537	250,968	252,084	7,118	7,784
114,523	115,100	4,351	8,249	251,609	252,629	7,562	8,603
115,750	116,629	4,125	7,689	254,356	255,357	35,977	6,817
116,197	117,399	4,060	7,549	272,603	273,443	5,392	3,935
118,518	119,708	3,693	8,108	275,676	276,787	4,796	3,430
119,834	120,534	3,518	6,827	282,780	283,251	11,939	8,306
120,795	121,594	3,401	6,941	291,564	295,440	3,037	1,893
122,066	122,559	3,238	7,403	292,730	295,158	9,138	6,184
123,169	123,685	3,124	7,677	303,781	305,250	2,323	1,866
124,471	125,605	3,030	6,971	305,442	307,851	6,586	4,010
125,068	125,443	3,013	6,728	328,986	331,979	10,674	2,765
126,585	127,354	3,103	6,627	334,352	337,293	9,736	2,596
128,530	129,643	3,102	6,103	359,131	362,480	6,841	1,892
129,484	129,888	10,816	19,981	359,918	364,001	6,788	1,739
130,166	131,114	3,014	5,874	362,557	366,741	6,630	2,071
131,416	132,465	2,892	6,770	362,562	365,518	6,631	1,934
132,377	133,209	2,774	6,098	381,358	386,395	5,736	1,338
133,084	134,733	2,672	5,481	392,596	396,571	5,402	1,463
134,471	135,719	2,516	5,675	392,843	396,680	5,386	1,676
137,513	138,995	2,125	5,693	407,924	412,777	5,096	1,278
139,559	140,434	2,017	6,085				